



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

EERIK JÄRVINEN

JÄNNITTEEN ETÄTOTEAJAN TURVALLISUUSVAIKUTUKSET
SÄHKÖRATATÖISSÄ

Diplomityö

Tarkastaja: Tutkimuspäällikkö Kari
Lahti

Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 8.10.2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

JÄRVINEN, EERIK: Jännitteen etätoteajan turvallisuusvaikutukset sähköratatöissä

Diplomityö, 64 sivua, 13 liitesivua

Joulukuu 2014

Pääaine: Sähköverkot ja –markkinat.

Tarkastaja: Tutkimuspäällikkö Kari Lahti

Avainsanat: sähkörata, jännitteen etätoteaja, sähkökenttä, riskianalyysi, soveltuvuus

Suuri osa Suomen rataverkosta on sähköistettyä rataa. Työskenneltäessä sähköistetyllä radalla on noudatettava turvaohjeita, jotka koskevat esimerkiksi vähimmäistyöskentely-etäisyyksiä jännitteisistä osista ja maadoitusten suorittamista. Sähköradalla jännite voi kytkeytyä työkohteeseen useammasta suunnasta, joten erityisesti työmaadoitukset ovat välttämättömiä turvallisen työskentelyn takaamiseksi. Sähköradalla sattuu sähköiskusta johtuvia kuolemantapauksia keskimäärin vuosittain, mutta lähes kaikissa tapauksissa kyse on ulkopuolisista, ns. maallikko-henkilöistä. Sähköradalla työskentelevien ammattilaisten sähköön liittyvät kuolemantapaukset ja tapaturmat eivät ole yleisiä, mutta niitäkin kuitenkin esiintyy. Vaikka sähkötapaturma ei johtaisikaan kuolemaan, seuraukset siitä ovat usein vakavia.

Tässä työssä tarkastellaan uuden Jännitteen etätoteaja (JET) -laitteen soveltuvuutta sähköradalla tehtäviin töihin ja sen turvallisuusvaikutuksia. Laitteen tarkoitus on parantaa työturvallisuutta helpottamalla jännitteisten kohteiden havaitsemista. Laite on tasakuun sopiva ja helppokäyttöinen. Sitä käytetään osoittamalla sillä kohteeseen, jonka jännitteestä ollaan kiinnostuneita. Laitteen toiminta perustuu sähkökentänvoimakkuuden mittaamiseen ja hälytykseen raja-arvojen ylittyessä.

Työssä esitetään yleiskuvaus Suomen ratajohtoverkosta ja turvaohjeista siellä työskenneltäessä. Työtä varten on laskennallisesti mallinnettu sähkökentän jakautumista ratajohdon ympäristössä sekä käytännössä testattu JET-laitetta suurjännitelaboratoriossa ja sähköradalla. JET-laitteita on myös ollut radan kunnossapitäjillä testikäytössä ja heiltä on saatu käyttökokemuksia ja mielipiteitä laitteesta ja sen käytöstä. Laitteesta laadittiin työhön myös riskianalyysi, jossa tarkasteltiin laitteen turvallisuusvaikutuksia. Laitteesta ja sen käytöstä löydettiin muutamia soveltuvuuteen vaikuttavia riskitekijöitä. Riskianalyysin ja käyttökokemusten pohjalta arvioitiin laitteen soveltuvuutta sähköratatöihin.

Tehtyjen tutkimusten perusteella tutkittavana olleen JET-laitteen voidaan todeta ilmaisevan oikein käytettynä sähkökentänvoimakkuuden mittauskohdassa. Testikäyttäjät eivät kuitenkaan juuri kokeneet tarvitsevansa testatun kaltaista laitetta nykyisen jännitteentoteamismenettelyn tueksi, vaan arvioivat laitteen vapaaehtoisen käytön jäävän vähäiseksi. Oikein käytettynä, yhdessä perinteisen jännitteentoteamisen kanssa, JET-laite epäilemättä kuitenkin parantaisi työturvallisuutta. JET-laitteen soveltuvuutta sähköratatöihin ja siitä saatavia hyötyjä heikentävät kuitenkin siitä löydetty kehittämistarpeet, testikäyttäjien arviot ja sen mahdollisesta väärinkäytöstä aiheutuvat riskit.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

JÄRVINEN, EERIK: Occupational safety of non-contact voltage detector used on electric-railway network installations.

Master of Science Thesis, 64 pages, 13 Appendix pages

December 2014

Major: Power systems and markets

Examiner: Research Manager Kari Lahti

Keywords: electric railway, non-contact voltage detection, electric field, risk assessment, suitability

Large part of the Finnish railway network has been electrified. When working on electric-railway safety instructions must be obeyed. These instructions include for example minimum working distances from live parts and procedures to carry out temporary earthings. In electric-railway voltage can be connected to the working area from several directions so especially temporary groundings are essential part of ensuring safe working conditions. On the electric railway deaths that result from electric shock happen in almost every case for so called laymen, such accidents happen on average yearly. Electricity related deaths and accidents among professionals working on the electric railway are very rare although those also do occur. Anyhow, even if an electricity related accident wouldn't result in death, the consequences are often serious.

In this work suitability of a new non-contact voltage detector (JET) and its safety has been examined. The purpose of the device is to increase safety at work by making it easier to detect live objects. The device is small and fits in pocket. It is used by pointing with it to the object which potential is currently of interest. The operation of the device is based on measuring the strength of the electric field and alarming when a priorly set limit has been reached.

This work gives a general description of Finnish electric-railway system and the safety instructions given for working on it. Distribution of the electric field in the surroundings of overhead contact line has been numerically modelled in certain cases and the JET device has been tested in practise both in High voltage laboratory and on electric-railway. These JET devices have also been in test use among maintenance personnel of electric-railway and user experiences and opinions about the device and its usability has been collected from them. Risk analysis of the device was also made to analyse safety aspects related to the usage of the device. Some limitations and risk factors related to these aspects were found. The overall suitability of the device for use in electric-railway was evaluated based on the risk assessment and user experiences.

Based on the studies conducted it can be stated that when correctly used, JET indicates the electric field strength in the measuring point. The evaluation of the test users was anyhow, that among conventional voltage detection procedures they did not feel this kind of extra voltage detection method needed and thus they probably would not use the device much on voluntary basis. Anyhow, when used properly with the traditional voltage detection methods the JET-device would without a doubt increase the safety at work. The suitability of it and the advantages gainable from the JET device are decreased by the limitations found from it, the risks coming from its possible incorrect use and the test users' evaluations of the little need for the device.

ALKUSANAT

Tämä työ tehtiin TTY:n Sähkötekniikan laitokselle ja työn tilaajana oli Liikennevirasto. Olen kiitollinen mahdollisuudesta tehdä diplomityöni tästä kiinnostavasta aiheesta. Haluan kiittää työn ohjaajaa Kari Lahtea sekä ohjausryhmän Juha-Matti Vilppoa ja Arja Toolaa. Kiitän myös laitteen suunnittelijoita ja testikäyttäjiä heidän avustaan ja kommentistaan. Haluan kiittää myös Sähkötekniikan laitoksen työkavereita. Kiitän myös vanhempiani ja veljiäni heidän tuestaan opiskelujen aikana. Erityisesti haluan kiittää vaimoani Elliä hänen tuestaan tämän projektin aikana.

Eerik Järvinen

Tampereella 12.11.2014

SISÄLLYS

Abstract	ii
Termit ja niiden määritelmät	vi
1 Johdanto.....	1
2 Sähkörata	2
2.1 Syöttöjärjestelmät.....	2
2.1.1 Imumuuntajajärjestelmä 25 kV	2
2.1.2 Säästömuuntajajärjestelmä 2x25 kV	3
2.2 Syöttöasemat	4
2.3 Ratajohdot.....	5
2.3.1 Avoradan ratajohdot	5
2.3.2 Erotusjakso.....	7
2.3.3 Ratapihojen järjestelyt	7
2.4 Sähköradan ohjaus.....	8
2.5 Sähkömagneettiset kentät sähköradan ympäristössä.....	8
2.6 Ratatyöt.....	8
2.7 Turvaohjeet	9
2.7.1 Vähimmäisetäisyysvaatimukset	9
2.7.2 Jännitekatko.....	10
2.7.3 Työmaadoitukset	13
3 Jännitteen etätoteaminen ja sähkökenttä sähköradalla	17
3.1 Jännitteen etätoteaminen.....	17
3.1.1 Sähkökentän teoriaa.....	17
3.1.2 Sähkökentänvoimakkuuden mittaaminen	20
3.1.3 Jännitteen kytketyminen	22
3.2 Sähköradan sähkökentän laskennallinen mallinnus ja mittaukset	23
3.2.1 Laskennalliset mallinnukset.....	23
3.2.2 Laboratoriomittaukset.....	36
3.2.3 Mittaukset radalla	42
4 JET - jännitteen etätoteaja ja sen käyttökokemukset	44
4.1 Perustoiminta	44
4.1.1 Fyysinen ja yleinen kuvaus	44
4.1.2 Mittaaminen	45
4.2 Toimintaperiaate.....	47
4.3 Käyttö rataympäristössä.....	48
4.4 Toimintavarmuus.....	48
4.5 Käyttökokemukset.....	49
4.6 Kehittämiskohteita.....	49
5 Riskianalyysi.....	51
5.1 Riskien arviointi	51
5.2 Merkittävimmät riskit	53

5.3	JET-laitteen avulla pienenevät riskit	54
6	Hyöty ja soveltuvuus	55
6.1	Sähköradoilla tapahtuneet sähkötapaturmat	55
6.2	JET-laitteella saavutettavat hyödyt ja sen soveltuvuus sähköratatöihin.....	57
6.3	JET-laitteen kustannukset ja mahdolliset haitat	59
6.4	Yhteenveto hyödyistä, kustannuksista ja soveltuvuudesta	59
7	Yhteenveto ja johtopäätökset.....	61
	Lähteet.....	63

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

E	Sähkökentän voimakkuus
Q	Varaus
F	Voima
ϵ	Permittiivisyys
\mathbf{r}	Yksikkövektori
i	Anturin virta
C	Kapasitanssi
u	anturin jännite
A	Pinta-ala
ω	Kulmataajuus
JET	Jännitteen etätoteaja
POA	Potentiaalisten Ongelmien-Analyysi
TTA	Työn Turvallisuus Analyysi
TVA	ToimintoVirhe-Analyysi
TUKES	Turvallisuus- ja kemikaalivirasto
Ajojohdin	Ajolangan ja kannattimen tai vain ajolangan muodostama johdin.
Erotusjakso	Rakenne, jossa ajojohdin on vierekkäisten syöttöalueiden rajalla eristetty pituussuunnassa kahdesta peräkkäisestä kohdasta, joiden väliin jää maadoitettu osa.
Imumuuntaja	Muuntaja, jonka ensiö on sarjassa ajojohtimen kanssa ja toisio paluujohtimen kanssa ja jonka tarkoitus on pakottaa paluuvirta kulkemaan paluujohtimessa.
Jännitekatko	Sähkölaitteiston tietyn osan tekeminen jännitteettömäksi.

Kiskonvarmistusjohdin	Yhtä paluukiskoa käytettäessä tämän rinnalle kytketty johdin, joka varmistaa paluuvirtatien kiskon katkeamisen varalta.
Käyttökeskus	Keskus, jossa käyttöpäivystäjä tekee keskitetysti sähköradan kytkentämuutoksia ja valvoo energian käyttöä.
M-johdin	Yleensä ilmassa oleva johdin, jota käytetään ratajohtopylväiden ja muiden rakenteiden maadoittamiseen paluukiskoon.
Ohitusjohdin	Ajojohtimen rinnalle kytkettävissä oleva muualta kuin syöttöasemalta lähtevä johdin, jolla voidaan ohittaa radan pituussuunnassa yksi tai useampia ajojohtimen sähköisiä ryhmiä.
Paluujohtin	Paluuvirtaa varten oleva johdin, joka liitetään paluukiskoon jokaisen imumuuntajavälin keskivaiheilla.
Paluukisko	Paluuvirtatien osana toimiva metallisesti yhtenäinen rata-kisko.
Paluuvirtatie	Osa sähköradan virtapiiriä, jota pitkin virta palaa sähköveturista tai sähköjunasta syöttöasemalle.
Päätyömaadoitus	Lähinnä ajojohtimen erotuskohtaa oleva ajojohtimen työmaadoitus.
Raidevirtapiiri	Eristetyn raideosuuden, jännitelähteen ja releen käämin muodostama virtapiiri, joka ilmaisee junan olemisen eristetyllä raideosuudella
Ratajohto	Ajojohtimen ja mahdollisen paluujohtimen tai vastajohtimen sekä kannatusrakenteiden ja varusteiden muodostama johto.
Ratatyö	Rautatiealueella tapahtuva kunnossapito- ja rakennustyö.
Ratatyöalue	Kulloinkin tehtävään ratatyöhön tarvittava alue.
Ratatyöilmoitus	Liikenteenohjaukselle annettava kirjallinen ilmoitus ratatyöstä.

Reduktiojohdin	Imumuuntajattomassa ja säästömuuntajattomassa järjestelmässä paluukiskon rinnalle kytketty johdin, jonka tarkoituksena on pienentää maan kautta palaavaa virtaa.
Riski	Vaaratilanteeseen liittyvän vamman tai terveystaiton todennäköisyyden ja vakavuuden yhdistelmä.
Riskinarviointi	Turvallisuustoimenpiteiden valintaa silmälläpitäen tehty laaja arvio vaaratilanteeseen liittyvän vamman tai terveystaiton todennäköisyydestä ja vakavuudesta
Ryhmityskaavio	Ajantasainen kaaviollinen esitys tietyn rataosan raiteiden jakaantumisesta sähköradan kytkentäryhmiin.
Syöttöasema	Kytkinlaitos, josta syötetään teho sähköradalle.
Säästömuuntaja	Sähköistysjärjestelmässä 2x25 kV radanvarteen sijoitettu muuntaja, jonka tarkoitus on pakottaa paluuvirta palaamaan vastajohtimessa.
Vastajohdin	Järjestelmään 2x25 kV kuuluva johdin, jolla on yhtä suuri, mutta vaiheeltaan vastakkainen jännite maata vastaan kuin ajojohtimella.
Vaara	Tekijä tai olosuhde, joka voi saada aikaan ei-toivotun tapahtuman.

1 JOHDANTO

Liikennevirasto hallinnoi Suomen rataverkkoa, josta suuri osa on sähköistettyä. Liikennevirasto on tilannut tämän diplomityön, jonka tarkoituksena on tutkia uuden jännitteisen kohteen läheisyyttä indikoivan laitteen turvallisuusvaikutuksia ja sen soveltuvuutta sähköistetyllä junaradalla tehtäviin töihin. Työ tehdään Tampereen teknillisen yliopiston Sähkötekniikan laitoksella.

Tässä työssä tutkittavalla jännitteen etätoteaja-laitteella (JET) voidaan havaita jänniteinen kohde etäältä, ilman fyysistä kosketusta kohteeseen. Sen toiminta perustuu jännitteisen kohteen havaitsemiseen kohteen luoman sähkökentän perusteella. Laite on toimintaperiaatteeltaan pieni sähkökenttämittari. Laite on tarkoitettu työntekijöille käytettäväksi muiden turvallisuusmenettelyjen rinnalle. Laitteita hankittiin selvitystä varten viisi kappaletta, joista yksi on tutkittavana kirjoittajalla ja neljä testikäytössä radan kunnossapitäjillä.

Työn tavoitteena on selvittää soveltuuko JET-laite käytettäväksi sähköradalla tehtävissä töissä ja millaisia turvallisuusvaikutuksia sen käytöllä voisi olla. Tämä selvitetään tutkimalla laitteen toimintaa, keräämällä käyttökokemuksia sen käytöstä sekä pohtimalla ja arvioimalla sen käyttöön liittyviä riskejä. Työssä käydään aluksi läpi Suomen ratajohtoverkon pääpiirteet ja radalla tehtävien töiden turvaohjeet luvussa 2. Luvussa 3 käydään läpi sähkökentän teoriaa ja jännitteen etätoteamisen mahdollisuuksia. Samassa luvussa sähköradalla esiintyvää sähkökenttää mallinnetaan laskennallisesti luomalla sähkökenttäkuvia ratajohdon ympäristöstä. Samalla voidaan tutkia sähkökentän jakautumiseen vaikuttavia tekijöitä, kuten radan muita rakenteita. JET-laitteen toimintaa tutkitaan myös TTY:n suurjännitelaboratoriossa, sekä käytännössä sähköradalla. Laboratoriossa ei ole mahdollista tutkia useampien sähköisten ajojohtimien yhteisvaikutusta, joten nämä tarkastelut on suoritettava ratapihalla.

Luvussa 4 annetaan yleiskuvaus JET-laitteesta ja sen käytöstä. Tässä luvussa tarkastellaan myös JET-laitteen testikäyttäjiltä kerättyjä käyttökokemuksia ja heidän näkemyksiään laitteesta. Luvussa 5 laaditaan riskianalyysi JET-laitteen käytöstä, jossa etsitään laitteen ja sen käytön mahdolliset riskit ja analysoidaan ne. Luvussa 6 tarkastellaan JET-laitteen hyötyjä ja soveltuvuutta riskianalyysin ja käyttökokemusten perusteella. Lopuksi luvussa 7 esitetään yhteenveto työstä ja arvio JET-laitteen soveltuvuudesta sähköratatöihin.

2 SÄHKÖRATA

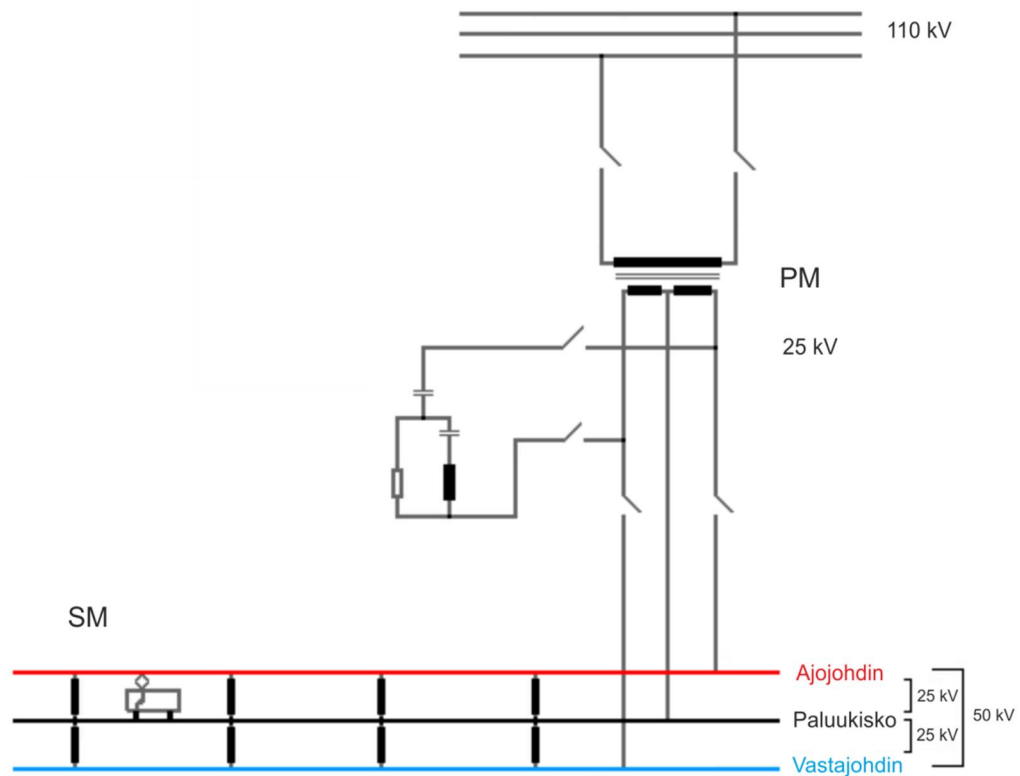
Liikennevirasto hallinnoi Suomen rataverkkoa. Liikennöityä rataverkkoa on noin 6000 km, tästä sähköistettyä rataa on 53 %. Sähköistetyllä radalla on käytössä 25 kV 50 Hz ratajohtojärjestelmä. Ratajohtoverkkoa syötetään Liikenneviraston omistamista 110 kV liittymistä, jotka kytkeytyvät Fingridin tai alueellisen jakeluverkon 110 kV johtoon. Ratajohtoverkon kautta siirtyvä sähköenergia vastaa noin prosenttia Suomen vuotuisesta kulutuksesta ja on vuositasolla noin 780 GWh. [1]

2.1 Syöttöjärjestelmät

Suomessa on käytössä kaksi syöttöjärjestelmää, imumuuntajilla varustettu 25 kV järjestelmä ja säästömuuntajilla varustettu 2x25 kV järjestelmä. Vetokaluston kannalta sähkönsyöttö on molemmissa järjestelmissä samanlainen. Virta kulkee ajojohtimesta veturin katolla olevan virroitimen kautta veturivirtapiiriin ja sitten paluukiskoon, josta edelleen paluujohtimeen. Normaalisti jännite ajojohtimen ja kiskon välillä on noin 22,5 kV - 29 kV. [1] Pohjoismaista Tanskassa on käytössä samanlainen järjestelmä kuin Suomessa, kun taas Ruotsissa ja Norjassa on käytössä 15 kV ja 16 2/3 Hz järjestelmä. Venäjällä käytetään 3 kV DC järjestelmää. [2]

2.1.1 Imumuuntajajärjestelmä 25 kV

Suomen maaperä on huonosti johtavaa, joten paluuvirran ei voida antaa kulkea vain kiskossa ja maassa takaisin syöttöasemalle vaan 25 kV järjestelmässä on käytössä erillinen paluujohtin. Tämä on järjestelmistä yleisempi ja siinä käytetään niin sanottuja imumuuntajia paluuvirran ohjaamiseen paluujohtimeen häiriöiden ja vaarajännitteiden vähentämiseksi. Syöttöasemalla päämuuntajan toision toinen napa on kytketty paluujohtimeen ja toinen napa katkaisijan kautta ajojohtimeen. [3] Radan varrelle on sijoitettu 1:1 virtamuuntajia imumuuntajiksi noin 2,6 km välein. Niiden ensiö kytketään sarjaan ajojohtimen ja toisio paluujohtimen kanssa. Imumuuntajavälin puolivälissä paluujohtin on yhdistetty paluukiskoon. Imumuuntaja pakottaa paluuvirran liitospisteessä paluukiskosta paluujohtimeen. Imumuuntajalla synnytetään paluujohtimeen sen jännitehäviön suuruinen vastakkaissuuntainen jännite sen reaktanssin pienentämiseksi. [3] [1] Kuvassa 1 kaavio imumuuntajajärjestelmästä.



Kuva 2 Periaatekaavio 2x25 kV säästömuuntajajärjestelmästä [3]

2x25 kV säästömuuntajajärjestelmää käytetään uusilla rataosuuksilla, kuten Kerava-Lahti ja paljon pohjoisessa. Suuremman siirtojännitteen vuoksi tehonsiirtokyky on imumuuntajajärjestelmää parempi ja syöttöasemien välinen etäisyys voi siten olla pidempi. [3]

2.2 Syöttöasemat

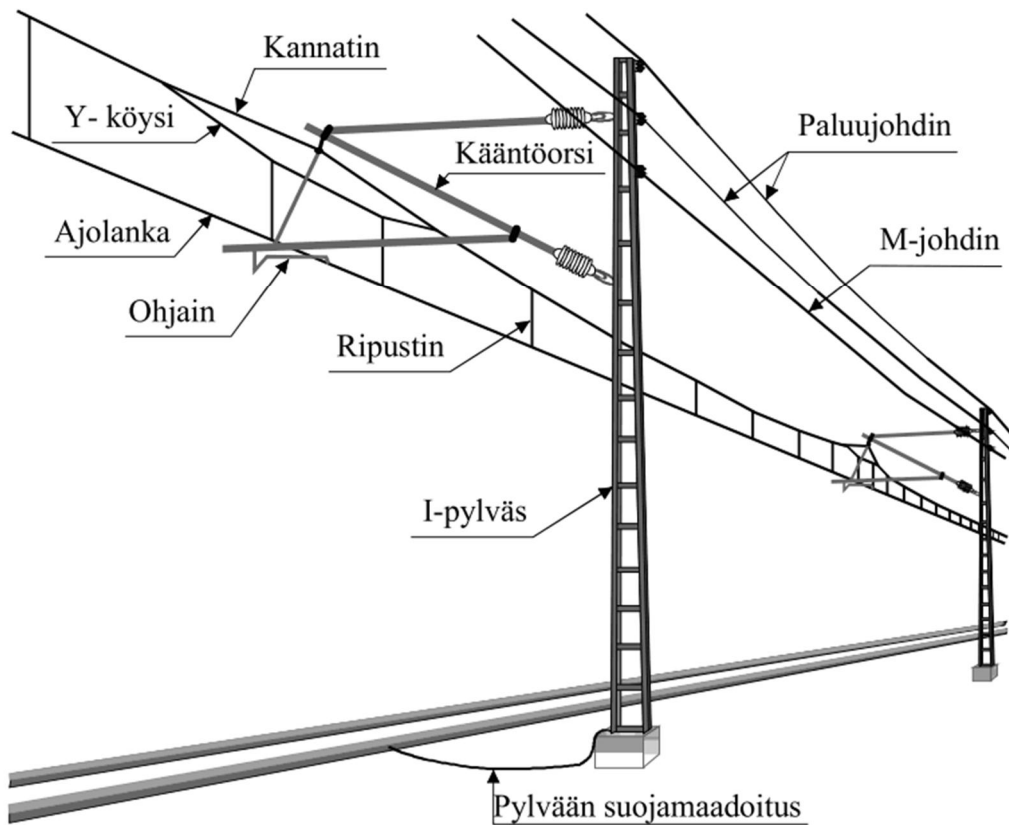
Ratajohtoverkkoa syötetään 82 syöttöasemalta, jotka liittyvät 110 kV verkkoon. Syöttöasemista 38 on liitetty alueellisiin verkkoihin ja 44 Fingridin kantaverkkoon. Syöttöasemilla käytetään tehontarpeen mukaan joko 7,5 MVA tai 12,4 MVA yksivaiheisia suurtehomuuntajia. Ajojohtimen jännitteen pitää olla standardin EN 50163 mukainen, eli alimmillaan hetkellisesti 17,5 kV ja pysyvästi 19,5 kV. Ylimmillään jännite saa olla hetkellisesti 29,5 kV ja pysyvästi 27,5 kV. Normaalisti jännite vaihtelee välillä 22,5 kV - 29 kV radan kuormitustilanteesta riippuen. [2] Imumuuntajajärjestelmässä syöttöasemien etäisyys toisistaan on yksiraiteisella radalla 30 - 35 km ja kaksiraiteisella 40 - 45 km. Säästömuuntajajärjestelmässä välimatka voi olla noin 90 km. Syöttöasemat on varustettu akkuvarmennetulla 110 V tasasähköjärjestelmällä varmistamaan turvalaitteiden toiminta häiriö- ja vikatilanteissa. Se syöttää suojareleitä, katkaisijoiden ohjauslaitteita ja kaukokäyttölaitteita. [1]

2.3 Ratajohdot

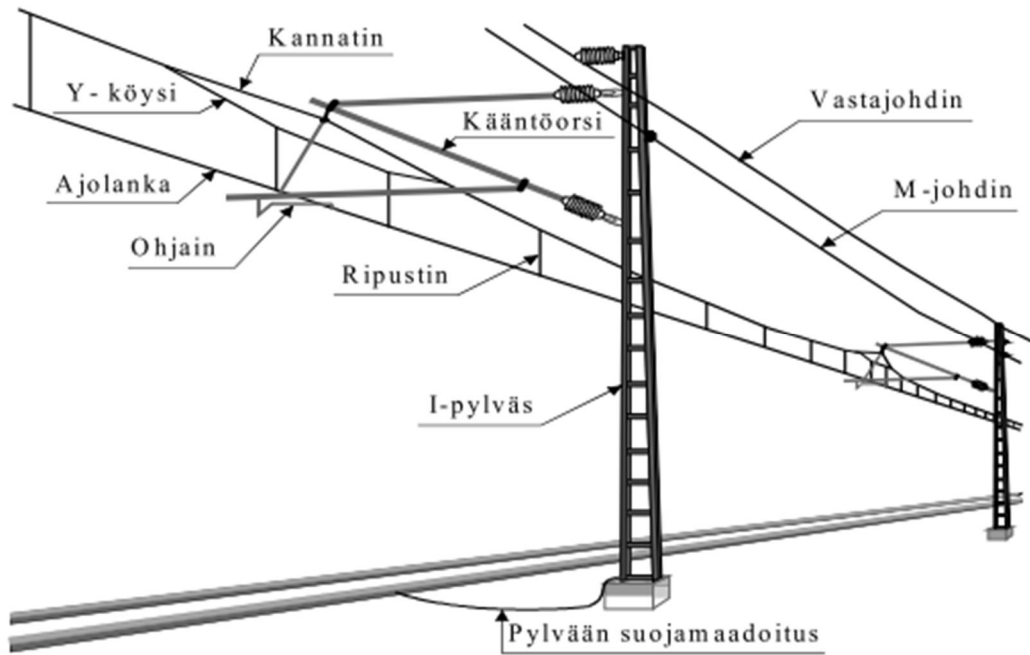
Ratajohto on ajojohtimen ja mahdollisen paluujohtimen tai vastajohtimen, sekä kannatusrakenteiden ja varusteiden muodostama järjestelmä. Ajojohdin koostuu ajolangasta ja kannattimesta, sekä muista siihen liittyvistä liitännöistä ja varusteista. Ajojohdin syöttää kalustoon sähkövirtaa virroittimien välityksellä. [1]

2.3.1 Avoradan ratajohdot

Ratajohdon rakenne ja osat poikkeavat hieman toisistaan 25 kV ja 2x25 kV järjestelmissä. 25 kV imumuuntajajärjestelmän ratajohtoa on havainnollistettu kuvassa 3. Kuvassa 4 on kuvattuna 2x25 säästömuuntajajärjestelmä, jossa on paluujohtimien sijasta vastajohdin.



Kuva 3 25 kV järjestelmän ratajohto avoradalla. [1]



Kuva 4 2x25 kV järjestelmän ratajohto avoradalla. [1]

Kuvissa 3 ja 4 näkyvien johtimien lisäksi on joissain tapauksissa käytössä myös K- ja R-johtimia. K- eli kiskonvarmistusjohdinta käytetään varmistamaan virran paluutie, kun paluuvirtatienä toimii vain toinen kisko. Tällaisia alueita voivat olla esimerkiksi yksiraitaisen radan tulo-opastimen ja vaihteen väli ja varoituslaitteilla varustetun tasoristeyksen lähiympäristö, joissa rata voi olla yksikiskoisesti eristettyä. K-johdinta ei kuitenkaan tarvita, jos käytössä on M- eli maadoitusjohdin. R- eli reduktiojohdinta käytetään pienentämään maassa kulkevaa virtaa, jos järjestelmässä ei ole käytössä imu- tai säästömuuntajia. Tämän tyyppisen järjestelmän käyttö on vähäistä Suomen maaperän huonon johtavuuden vuoksi. [4]

Ratajohtopylväiden etäisyys raiteen keskilinjasta on uusilla pylväillä 3,1 m. Vanhoilla pylväillä voidaan käyttää etäisyyksiä 2,75 m pääraiteella ja 2,5 m sivuraiteella. Pylväillä on sähköinen yhteys maahan pylväsperustuksen kautta, lisäksi pylväät maadoitetaan paluukiskoon. M- johtimellisella alueella jokainen ratajohtopylväs yhdistetään M-johtimeen ja M-johtimen kiskoonliityntäpylväät maadoitetaan paluukiskoon. [1]

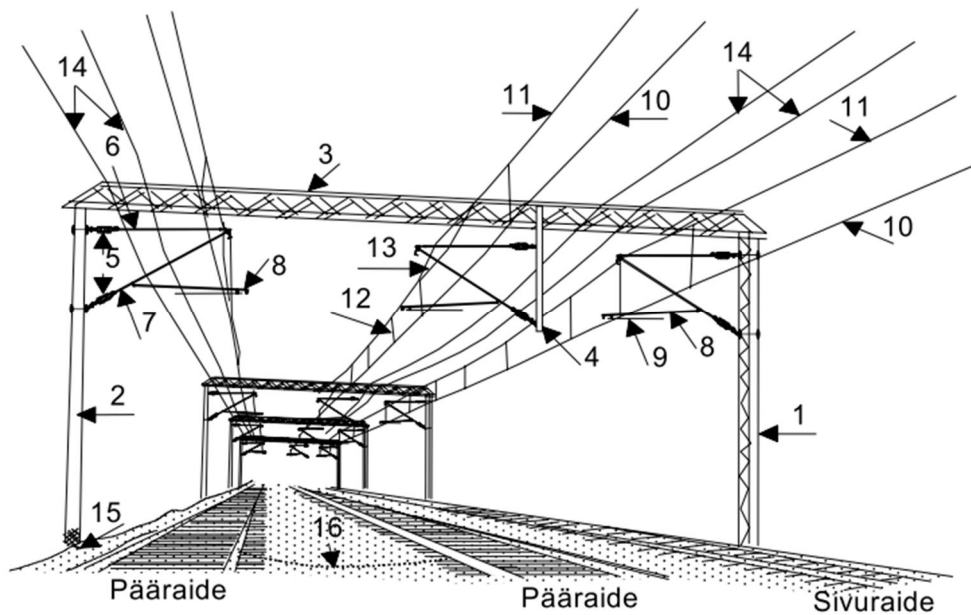
Ajojohtimen korkeus kiskotasosta on 5,60 m – 6,60 m. Nimellisarvoksi on kuitenkin mikäli mahdollista valittava kannatuspisteen kohdalla 6,15 m. Ratajohtimen poikkipinta määräytyy liikennetiheyden mukaan ja on pääraiteilla 100 mm² ja muilla raiteilla yleensä 80 mm². Kiristyskentillä ja kiristinlaitteilla pyritään pitämään ajojohtimen köysivoimat mahdollisimman vakiona. Ajojohdin ei kulje täysin suorassa rataa nähden, vaan tekee siksakkia, jotta veturin virroittimen hiilet kuluisivat tasaisesti. [1]

2.3.2 Erotusjakso

Ratajohto on jaettu sähköisesti syöttöalueisiin erotusjaksojen avulla. Erotusjakso erottaa vierekkäiset syöttöalueet sähköisesti toisistaan, jotta niitä voidaan ohjata jännitteettömiksi tarpeen mukaan. Erotusjakso sijaitsee yleensä syöttöasemien puolivälissä. Erotusjakson kohdalla ajojohdin on eristetty kahdesta peräkkäisestä kohdasta ja maadoitettu niiden välistä. Veturi ajaa erotusjakson yli pääkytkin auki asennossa, mikä on käytännössä hoidettu automaattisesti erotusjakson molemmin puolin sijoitettujen magneettien avulla, jotka veturin pohjassa oleva tunnistin havaitsee. [1]

2.3.3 Ratapihojen järjestelyt

Ratapihat ovat toimintaympäristöltään paljon yksittäistä raidetta haasteellisempia, koska raiteita ja siten myös useita jännitteellisiä ajojohtimia sijaitsee lähellä toisiaan. Ratapihoilla on myös paljon junaliikennettä, mikä luonnollisesti asettaa omat haasteensa tässä ympäristössä toimimiselle. Ratapihoilla on usein sijoitettu samaan pylväsrakenteeseen useamman radan ajo- ja muut johtimet. Tätä havainnollistetaan kuvassa 5.



Kuva 5 Ratajohto ratapihalla, 25 kV järjestelmä. [1]

- | | | |
|--------------------|------------------------|--------------|
| 1. Pylvään numero | 10. Ajolanka | } Ajojohdin |
| 2. Portaalin jalka | 11. Kannatin | |
| 3. Portaalin orsi | 12. Ripustin | |
| 4. Ripustusorsi | 13. Y-köysi | |
| 5. Eristin | 14. Paluujohdin | } Kääntöorsi |
| 6. Ylätuki | 15. Pylvään maadoitus | |
| 7. Vinotuki | 16. Poikittaisyhdistys | |
| 8. Sivutuki | | |
| 9. Ohjain | | |

Kuten kuvasta 5 havaitaan, johtimia on ilmassa useita. Osa johtimista on jännitteisiä ja osa maadoitettuja. Tässä ympäristössä jännitesyötöstä erotetussa johto-osassa saattaa olla toisista ajojohtimista indusoitunut jännite. Ratapihoilla ajojohtimet jaetaan sopiviin sähköisiin ryhmiin ryhmityseristimien avulla. Ryhmiä voidaan ohjata jännitteettömiksi tarpeen mukaan. Sähköistettyjen raiteiden paluukiskot yhdistetään poikittaisyhdistyksillä toisiinsa ratapihoilla ja kaksi- tai useampiraiteisilla osuuksilla. Raidevirtapiirit vaikuttavat yhdistysten sijaintiin ja toteutukseen. [1] Ratapihoilla voi kulkea myös jännitteellisiä ohitusjohtimia, vaikka koko ratapihan alue olisi muuten jännitteetön. Voidaan siis sanoa, että sähkötyöturvallisuusmielessä ratapihaympäristössä työskentely on varsin haasteellista.

2.4 Sähköradan ohjaus

Ohjaus suoritetaan käyttökeskuksista, joista voidaan ohjata sähköradan muuntajia ja kytkinlaitteita. Rataosuuksia voidaan tehdä jännitteettömiksi tarpeen mukaan. Moniraiteisilla osuuksilla, kuten kaksoisradalla ja ratapihoilla järjestelmä on toteutettu sähköisesti siten, että yksittäinen raide tai raideryhmä voidaan tehdä jännitteettömäksi ja samalla pitää viereisen radan jännitteet päällä ja rata liikennöitävänä. Käyttökeskuksissa tarkkaillaan sähköradan toimintaa ja tilaa, sekä tehdään jännitekatkot ja vastaanotetaan vikailmoitukset. [4]

2.5 Sähkömagneettiset kentät sähköradan ympäristössä

Sähköradan jännitteiset ja virralliset johtimet ja muut komponentit luovat ympärilleen sähkö- ja magneettikenttiä. Nämä kentät ovat pääosin 50 Hz taajuisia ja niiden voimakkuudet suhteellisen pieniä. Voimakkaiden sähkömagneettisten kenttien biologiset vaikutukset ovat hyvin tunnettuja, kun taas heikkojen kenttien pitkäaikaisvaikutusten mekanismeja ei tunneta. Niillä on epäilty olevan terveysvaikutuksia ja esimerkiksi kasvattavan syöpäriskiä. Tämän vuoksi onkin laadittu direktiivi (2000/40/EY) työntekijöiden suojelemiseksi sähkömagneettisille kentille altistumisesta aiheutuvilta riskeiltä. Direktiivissä on annettu käytännössä mitattavissa olevat toiminta-arvot, joiden alittuessa varmistuu vastaavien altistumisen raja-arvojen noudattaminen. Työntekijöitä koskevat toiminta-arvot ovat 50 Hz taajuudella 10 kV/m [E] ja 500 μ T [B] ja väestön altistumista koskevat viitearvot 5 kV/m [E] ja 100 μ T [B]. Sähköradan ympäristössä kentänvoimakkuudet eivät ylitä näitä raja-arvoja vaan jäävät selvästi niiden alle. [5]

2.6 Ratatyöt

Ratatyöt jaetaan ennalta suunniteltuun ratatyöhön ja kiireelliseen ratatyöhön. Ennalta suunniteltuun ratatyöhön laaditaan yhdessä liikenteenohjauksen kanssa enakkosuunnitelma. Kiireellisestä ratatyöstä laaditaan vain ratatyöilmoitus. Joitain ratatöitä, joissa liikennettä ei tarvitse rajoittaa voidaan suorittaa turvamiesmenettelyllä, jolloin ratatyöilmoitusta eikä enakkoilmoitusta tarvita.

Ennalta suunnitelluista töistä laaditaan kirjallinen ennakkosuunnitelma, joka lähetetään liikenteensuunnitteluun. Ratatyöstä josta on vaikutusta ratakapasiteetin jakamiseen ja käyttöön, on ennakkosuunnitelma tehtävä vähintään kahta kuukautta ja muista töistä 14 vuorokautta ennen ratatyön suunniteltua alkamisajankohtaa. Ennakkosuunnitelman pohjalta liikenteensuunnittelija laatii ennakkoilmoituksen viimeistään viisi vuorokautta ennen työn aloittamista.

Ratatyöstä annetaan Ratatyöilmoitus ennen kuin pyydetään lupaa ratatyöhön. Ilmoitus toimitetaan kirjallisesti RAILI-puhelinluettelossa olevaa yhteystietoa käyttäen. Kii-reellisessä ratatyössä voidaan ratatyöilmoitus antaa liikenteenohjaukselle myös suulli- sesti, jos sen toimittaminen kirjallisesti ei olosuhteiden vuoksi ole mahdollista.

Ratatyölle on aina nimettynä ratatyöstä vastaava, jolle kuuluvat ratatyön turvallisuus- teen vaikuttavat tehtävät. Hän huolehtii viestinnästä ratatyöalueensa ja liikenteenohja- uksen kanssa. Viestintä hoidetaan RAILI-puhelinverkkoa käyttäen. Ratatyöstä vastaa- van on oltava ratatyöalueella tai sen läheisyydessä työn ajan. Jos on kyse sähkötöistä, niin jokaiselle työlle on lisäksi määrättävä sähkötöistä vastaava henkilö ja jokaiseen työkohteeseen pätevä henkilö valvomaan työnaikaista sähkötyöturvallisuutta. Näin täy- tetään sähkötyöturvallisuus standardin SFS6002 vaatimukset [6].

Ennen kuin ratatyö aloitetaan ratatyöstä vastaava pyytää liikenteenohjaukselta lupaa ratatyöhön RAILI-puhelimella. Jokaiselle ratatyölle luodaan yksilöivä tunnus, jota käy- tetään työn ajan. Työn päätyttyä ratatyöstä vastaava ilmoittaa siitä liikenteenohjaukseen varmistettuaan, että radan kunto on tarkastettu. [7]

2.7 Turvaohjeet

Vähimmäisetäisyysvaatimuksilla, kosketussuojaurakenteilla ja maadoittamisella torju- taan suurjännitteisen ratajohdon normaalista käytöstä ja sen vikatilanteista ihmisille ja omaisuudelle aiheutuvaa vaaraa. Sähkörataohjeessa annetuissa ohjeissa määritellään jännitekatkomenettelyn vaiheet ja tarvittavien työmaadoitusten käyttö. Näin estetään jännitteen kytkeytyminen työn alla olevaan kohteeseen ja sitä kautta työntekijöille ai- heutuva hengenvaara. [8]

2.7.1 Vähimmäisetäisyysvaatimukset

Seuraavassa esitellään erilaisia vähimmäisetäisyysvaatimuksia eri tilanteisiin. Vähim- mäisetäisyysvaatimuksia noudattamalla voidaan työskennellä jännitteisten osien lähis- töllä ilman, että jännitekatkoa tarvitsisi työn vuoksi tehdä. Työn turvallisuudesta vastaa- van henkilön tulee valvoa, että vähimmäisetäisyysvaatimuksia ei aliteta ja harkittava tarvitaanko muita toimenpiteitä. Tehtäessä sähkötöitä, jokaisessa työkohteessa tulee olla nimettynä pätevä henkilö valvomaan työnaikaista sähköturvallisuutta.

Pienin tehtävään perehdytetyn henkilön työskentelyetäisyys ratajohdon jännitteisistä osista on 2 m. Sähköalan ammattilaisille sallitut työskentelyetäisyydet selviävät taulu- kosta 1.

Taulukko 1 Pienimmät työskentelyetäisyydet ratajohdon jännitteisistä osista. [8]

työntekijä	pienin työskentelyetäisyys 25 kV jännitteisistä osista		pienin työskentelyetäisyys paluujohtimesta	
	sivulla	alapuolella	sivulla	alapuolella
sähköalan ammattihenkilö	1,5 m	1,5 m	0,5 m	0,5 m
tehtävään opastettu henkilö	2,0 m	2,0 m	2,0 m	2,0 m

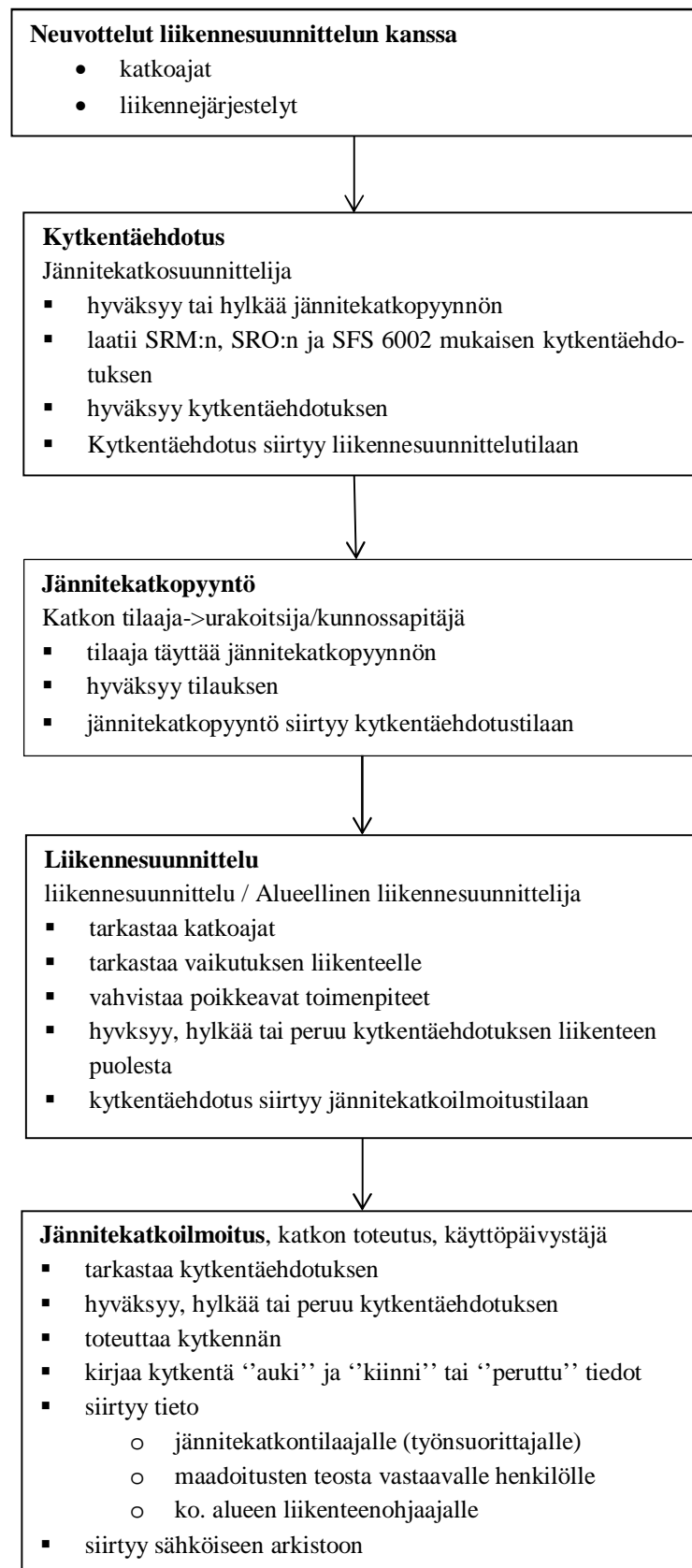
Katkenneesta tai maahan pudonneesta johtimesta saattaa aiheutua vaarallinen niin sanottu askeljännite. Turvaetäisyys tällaisesta johtimesta on 20 m, lisäksi tilanteesta on toimitettava aina välittömästi tieto käyttökeskukseen. Syöttö- ja välilytkinasemilla noudatetaan SFS 6002 Sähkötyöturvallisuus standardin mukaisia työskentelyetäisyyksiä jännitteisistä osista. [6]

Jännitteisten johtimien alla on kiellettyä nousta veturien, vaunujen ja kiskojen tasosta mitattuna yli 1,7 m korkeiden työkoneiden päälle. Nosturit on maadoitettava paluukiskoon ja niiden liikeradat ja työskentelyalueet eivät saa ulottua 3 m lähemmäksi 25 kV jännitteistä osaa, eivätkä 2 m lähemmäksi paluujohtinta. Jos työskentelyalue ulottuu 5 m lähemmäksi jännitteistä osaa, on työhön haettava lupaa käytönjohtajalta. [8]

2.7.2 Jännitekatko

Jännitekatko vaaditaan silloin, kun työnaikaisesta sähköturvallisuudesta ei voida muuten huolehtia ja aina kun alitetaan pienin työskentelyetäisyys. Häätötilanteessa jokainen henkilö voi vaatia käyttökeskukselta jännitekatkoa ja se on suoritettava välittömästi. Kun kyse ei ole nopeaa korjausta vaativista vika- ja vauriotilanteista, niin jännitekatkon toteuttaminen edellyttää kirjallista kytkentäohjelmaa. Tällaiset jännitekatkot on siis suunniteltu ennalta. Jännitekatkon aikana ylläpidetään jännitekatkoilmoitusta, johon kirjataan ja kuitataan tehdyt toimenpiteet. Prosessikaavio jännitekatkomenettelystä on esitetty kuvassa 6.

JÄNNITEKATKOPROSESSIKAAVIO



Kuva 6 Jännitekatkoprosessikaavio [8]

Kaavio kuvaa jännitekatkon suunnittelun vaiheet ja toteutuksen sen suorittamiseen asti. Seuraavaksi on listattuna järjestyksessä toimenpiteitä, jotka liittyvät jännitekatkoon. Osa toimenpiteistä tuli esille jo jännitekatkoprosessikaaviossa.

1. Jännitekatkopyyntö
2. Kytkenäehdotus
3. Jännitekatkoilmoitus
4. Erottaminen jännitteestä
5. Jännitteen kytkemisen estäminen
6. Jännitteettömyyden toteaminen
7. Päätyö- ja muiden työmaadoitusten tekeminen
8. Työn aloittamislupa
9. Työn päättymisilmoitus
10. Työ- ja päätyömaadoitusten poistaminen
11. Kytkenä

Ensimmäiset kolme kohtaa käsiteltiin jo prosessikaaviossa. Keskitytään nyt niitä seuraaviin kohtiin listalla. [8]

Erottaminen jännitteestä ja kytkemisen estäminen

Jännitteestä erotettavaa kytkentäryhmää rajaa erotusjakso, erotuskenttä tai ryhmityseris-tin. Kaikki erottimet, joilla kyseinen johto-osuus on kytketty verkkoon, avataan. Kyt-kennän suorittaa käyttökeskus tai kytkennän suorittajaksi määrätty sähköalan ammatti-lainen paikallisohjauksen avulla. Ennen kytkennän suorittamista jännitekatkoon on saa-tava liikenteenohjauksen lupa. Jos kyseisellä osuudella on käytössä paluujohdin, on huolehdittava sen erottamisesta viereisten raiteiden paluujohtimista.

Jännitteestä erottamisen lisäksi jännitteen kytkeminen työpisteeseen on estettävä. Tämä toteutetaan ohjausjärjestelmästä riippuen hieman eri tavoilla, lukitsemalla erotin, poistamalla asian omainen ohjauspainike, asentamalla ohjauksen estopainike tai käyt-tämällä kauko-ohjauksen estologiikkaa. Kauko-ohjattavien erottimien ohjauskaapit tulee olla lukittuina ja käsin ohjattavat erottimet tulee lukita sovittuun asentoon. Lisäksi täy-tyy varmistaa, ettei pylväissä olevia erottimia suljeta käsikäyttöisesti, tähän käytetään kieltokilpiä. [8]

Jännitteettömyyden toteaminen

Jännitteestä erottamisen jälkeen ja ennen maadoitusten tekoa jännitteettömyydestä on varmistuttava, hyväksytyllä jännitteenkoettimella. [8] Tämä on turvallisuuden kannalta erittäin tärkeää, koska inhimilliset virheet ja väärinkäsitykset ovat aina mahdollisia. Jännitteenkoettimina käytetään perinteisiä kosketukseen perustuvia jännitteenkoettimia, jotka nostetaan maasta käsin pitkän sauvan avulla kiinni johtimeen.

Tässä työssä tarkastellaan myös sitä, voitaisiinko JET-laitetta käyttää apuna tässä työvaiheessa. JET-laite on tällä hetkellä tarkoitettu lisäturvalaitteeksi, eli sillä saa tehdä vain lisävarmistuksia jännitteettömyydestä perinteisellä menetelmällä tehdyn toteamisen lisäksi. Sen mahdollista käyttöä yksinään jännitteettömyyden toteamiseen voidaan kuitenkin myös pohtia.

Päätyö- ja muut työmaadoitukset

Maadoitukset on tehtävä mahdollisimman pian jännitteestä erottamisen ja jännitteettömäksi toteamisen jälkeen. Ne sijoitetaan siten, että jännite ei voi kytkeytyä työkohteeseen mistään suunnasta. Maadoituksia käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.7.3.

Työn aloittaminen ja päättäminen

Työn aikana ylläpidetään jännitekatkoilmoitusta. Siihen kuitataan maadoitusten suorittaminen, jonka jälkeen voidaan antaa työn aloittamislupa. Kun työ päättyy, maadoitusten poistajalle toimitetaan kirjallinen työn päättymisilmoitus ennen maadoitusten poistamista. Myös tästä tehdään kuittaukset jännitekatkoilmoitukseen. Maadoitusten poistamisesta ja ratajohdon kytkentäkelpoisuudesta ilmoitetaan käyttökeskukseen, joka voi nyt kytkeä jännitteet takaisin. Käyttökeskus ilmoittaa liikenteenohjaukselle, että jännitteet on kytketty. [8]

2.7.3 Työmaadoitukset

Työmaadoitukset ovat hyvin tärkeä turvallisuustoimenpide, jolla varmistetaan työkohteen pysyminen jännitteettömänä. Vaikka työn alla oleva johto-osa on erotettu jännitesyötöstä, voi siihen jostakin syystä kuitenkin päästä jännite esimerkiksi inhimillisen erehdyksen, teknisen vian tai ilmastollisen ylijännitteen johdosta. Maadoitukset on tehtävä mahdollisimman pian jännitteestä erottamisen ja jännitteettömäksi toteamisen jälkeen. [8]

Maadoitusten sijainti

Päätyömaadoitukset sijoitetaan siten, että jännite ei voi milteään suunnalta kytkeytyä työskentelyalueelle. Maadoitukset tehdään ajojohtimen erotuskohtaan tai muuhun sopivaan kohtaan. Työmaadoitukset tehdään ennen työn aloittamista molemmin puolin työkohdetta, pääsääntöisesti näköetäisyydelle työkohteesta.

Sijoitusperiaatteena maadoituksilla on, että jokaisen erotusilmavälin, jonka yli virroitin voi kytkeä jännitteen, ja työalueen välissä on vähintään kaksi maadoitusta ja että työналаista kytkentäryhmää syöttävän erottimen ja työalueen välissä on vähintään yksi työmaadoitus. Jos viereisten raiteiden ajojohtimissa on jännite, niin työmaadoitusten etäisyys toisistaan saa maksimissaan olla 600 m. Jos jännitekatko käsittää kaikki vierekkäiset radat tai ollaan yksiraiteisella radalla, niin työmaadoitusten etäisyys toisistaan saa

maksimissaan olla 3000 m. Jos maadoitettavan johtimen lähistöllä kuitenkin on indusoiva johdin, maadoitukset on sijoitettava lähemmäksi toisiaan. [8]

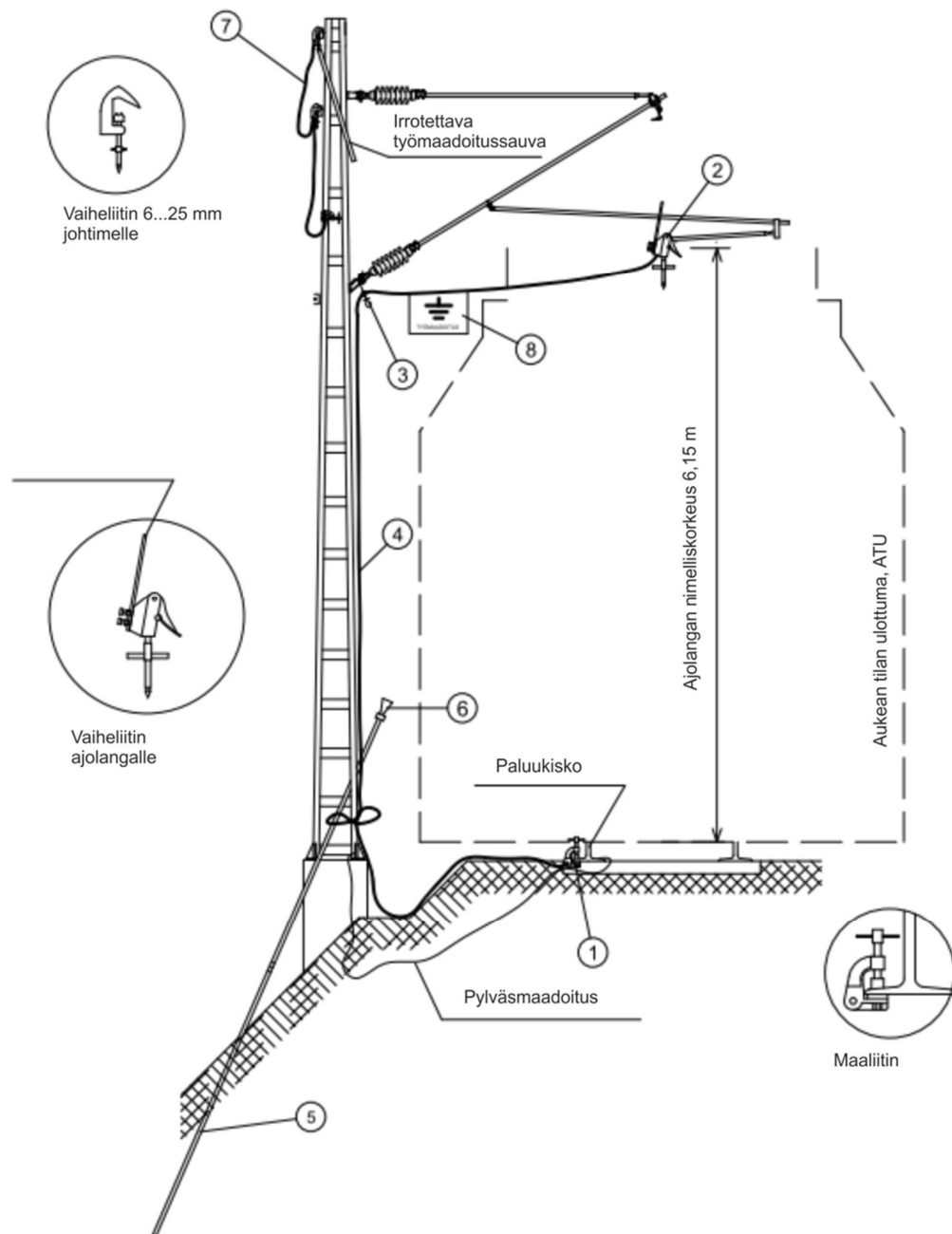
Työmaadoituksia tehdessä on huomioitava raidevirtapiirien toiminta. Raidevirtapiireissä käytettävään paluuvirtatiestä erotettuun kiskoon ei saa tehdä työmaadoitusta. Kaksikiskoisilla raidevirtapiiriosuuksilla maadoituksia tehtäessä on otettava huomioon niiden vaikutus raidevirtapiirin toimintaan. [1]

Maadoituksen suorittaminen

Maadoituksessa luodaan hyvin johtava yhteys maan ja virtapiirin johtimien välille. Pääsääntöisesti työmaadoitus tehdään paluukiskon ja jännitteestä erotetun osan välille. Paluujohdin työmaadoitetaan metalliseen ratajohtopylvääseen. Muutkin jännitteiset osat voidaan maadoittaa metalliseen ratajohtopylvääseen, jos se on varmistetusti maadoitettu paluukiskoon. Varmistetusti maadoitettu tarkoittaa, että se on maadoitettu kahdella erikseen mekaaniset ja sähköiset vaatimukset yksinään täyttävällä johtimella.

Maadoitusten teko kuuluu sähköalan ammattihenkilölle. Ensin maadoitetaan ajojohdin ja sitten paluu- tai vastajohdin. Yleensä työskenneltäessä paluu- tai vastajohtimella, myös ajojohdin on työskentelyetäisyyksien takia maadoitettava. Ajojohtimen maadoitus puretaan viimeiseksi.

Maadoituksen suorittamisen tarkka järjestys käydään läpi Liikenneviraston julkaisemissa Sähkörataohjeissa. Pääpiirteissään työmaadoitus tehdään seuraavasti. Ajojohdinta maadoitettaessa ensin kiskoliitin kiinnitetään kiskoon tai M-johtimella maadoitettuun pylvääseen ja sitten puristusliitin ajojohtimeen maadoitussauvan avulla. Maadoitusjohdin sidotaan pylvääseen. [8] Kuvassa 7 on esitetty maadoitus tehtynä 25 kV järjestelmän ratajohdolle ja siinä käytetyt maadoitusvälineet.



Kuva 7 Ajo- ja paluujohtimen siirrettävät työmaadoitusvälineet [8]

Kuvassa esiintyvät välineet

1. Maaliitin hammaslevyllä (paluukiskoon)
2. Vaiheliitin ajolangalle
3. Apukoukku
4. Työmaadoitusjohdin
5. Työmaadoitussauva
6. Ohjaussuppilo
7. Paluujohtimen työmaadoitusvälineet
8. Varoituslippu

Maadoitus puretaan vastakkaisessa järjestyksessä kuin se on suoritettu, ensin paluu- tai vasta-johdin ja viimeiseksi ajojohdin. Maadoitusta johtimesta poistettaessa ensin irrotetaan maadoitussauvan avulla johdossa oleva maadoitusliitin ja sitten irrotetaan maadoitus paluukiskosta tai pylväästä. [8]

Hätämaadoitus

Hätämaadoitus tehdään onnettomuus-, vaurio- ja hätätilanteissa, jos pelastustoimia ei voi muuten suorittaa turvallisesti. Hätämaadoitukset tehdään onnettomuuskohdan molemmin puolin, joko paluukiskoon tai metalliseen ratajohtopylvääseen. Jos paikalla ei ole sähköalan ammattihenkilöä, velvollisuus hätämaadoituksen tekoon on tehtävään koulutetulla veturimiehistöllä, työkoneenkuljettajalla, palokunnalla tai rautatieyrityksen pelastusyksikköön kuuluvalla henkilöllä. [8]

3 JÄNNITTEEN ETÄTOTEAMINEN JA SÄHKÖKENTTÄ SÄHKÖRADALLA

3.1 Jännitteen etätoteaminen

Jännitteellinen johdin aiheuttaa ympärilleen sähkökentän ja jos johtimessa kulkee myös virtaa, syntyy johtimen ympärille myös magneettikenttä. Näitä kenttiä mittaamalla on mahdollista todeta etäältä johdon jännitteisyys ja virrallisuus. Sähkökenttä riippuu vain johdon jännitteestä, kun taas magneettikenttä on riippuvainen johdolla kulkevasta virrasta. Tässä tapauksessa onkin viisaampaa keskittyä vain sähkökenttään, koska näin voidaan tunnistaa myös jännitteellinen johdin, jossa ei sillä hetkellä kulje virtaa. [9]

3.1.1 Sähkökentän teoriaa

Jännitteinen 25 kV ratajohto aiheuttaa ympärilleen sähkökentän. Kentän voimakkuus suoraan johdon alapuolella 2 m korkeudessa on simulointien ja mittausten perusteella noin 1400 V/m. Ratajohdon jännite vaihtelee välillä 19,5 kV – 29,5 kV, jolloin myös kentänvoimakkuus vaihtelee vastaavasti. Kentänvoimakkuus pysyy kuitenkin samassa luokassa kuin nimellisellä jännitteelläkin. Taulukossa 2 esitellään avojohtojen aiheuttamia sähkökentänvoimakkuuksia eri jännitetasoilla.

Taulukko 2. Sähkökentän voimakkuuksia erilaisten avojohtojen läheisyydessä [9].

sähkökentän lähde	sähkökentän voimakkuus (V/m)
400 kV voimajohdon alla	1000 - 10000
400 kV voimajohdon sivulla (20 - 30 m)	500 – 2000
110 kV voimajohdon alla	200 – 3000
110 kV voimajohdon sivulla (20 - 30 m)	50 – 300
20 kV avojohdon alla	20 – 100
20 kV avojohdon sivulla (10 m)	20 - 50

Taulukosta 2 havaitaan, että kentänvoimakkuus siirtolinjoilla on huomattavasti suurempi kuin 20 kV jakeluverkossa. 25 kV ratajohtoverkossa kentänvoimakkuus on jakeluverkkoa huomattavasti suurempi, koska 25 kV on vaihejännite kun taas jakeluverkossa 20 kV on pääjännite. Lisäksi kolmevaiheisessa jakeluverkossa eri vaiheissa olevien johtimien luomat sähkökentät summautuvat yhteen. Ratajohtoverkossa kentänvoimakkuus on selkeästi riittävän suuri, jotta sitä mittaamalla pystytään tunnistamaan johtimen jännitteellisyys.

Perusteoria

Sähkövaraus synnyttää ympärilleen sähkökentän. Sähkökentän voimakkuus E (V/m) määritellään kentän positiiviseen varaukseen Q kohdistaman voiman F ja varauksen Q suhteena yhtälön 1 mukaisesti.

$$E = \frac{F}{Q} \quad (1)$$

Sähkökentän suunta on se suunta, johon kentässä oleva positiivinen varaus pyrkii kulkemaan. [9] [10] Sähkökentänvoimakkuus on vektorisuure, jolla on suuruus ja suunta. Sähkökenttää voidaan kuvata graafisesti sähkökenttäviivojen ja tasapotentialipintojen avulla. Kenttäviivojen tiheys on verrannollinen sähkökentän voimakkuuteen. [10] [11]

Esimerkkeinä sähkökentän voimakkuuden määrittämisestä esitetään seuraavaksi kolme yksinkertaista tilannetta; pistemäinen varaus, äärettömän pitkä suora johdin ja kaksi sähköisesti varattua levyä.

Pistemäisen varauksen Q aiheuttama sähkökentän voimakkuus E on

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \mathbf{r} \quad (2)$$

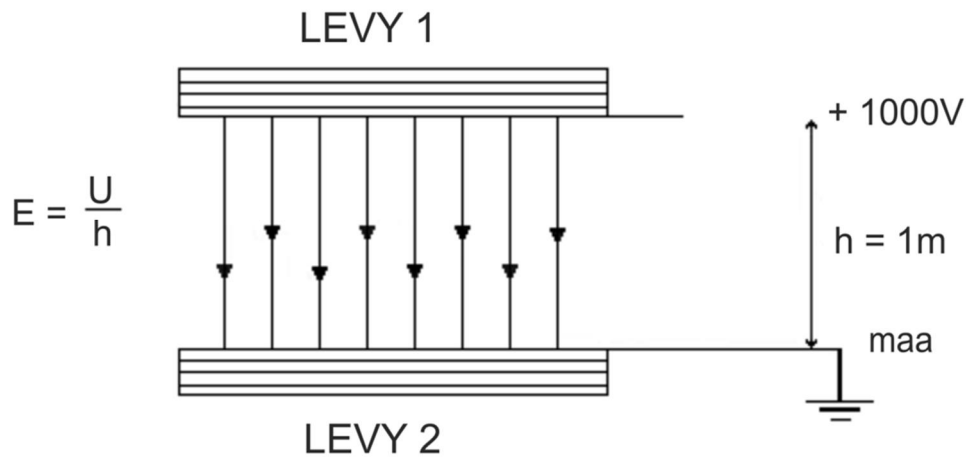
missä E on sähkökentän voimakkuus, Q on varaustiheys, ϵ on väliaineen permittiivisyys, r on etäisyys kentänaiheuttajasta ja \mathbf{r} etäisyyden yksikkövektori.

Äärettömän pitkän suoran johtimen kenttä on lieriösymmetrinen. Johdin ajatellaan niin pitkäksi, ettei päiden kenttäkuvaa tarvitse ottaa huomioon. Kentän suunta on johtimen lähialueella kohtisuoraan johdinta vastaan. Pitkän suoran ja varatun johtimen kentänvoimakkuus saadaan yhtälöstä.

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon r} \mathbf{r} \quad (3)$$

missä E on sähkökentän voimakkuus, Q on varaustiheys, ϵ on väliaineen permittiivisyys, r on etäisyys kentänaiheuttajasta ja \mathbf{r} etäisyyden yksikkövektori. [11]

Kahden äärettömän suuren sähköisesti varatun levyn välissä vallitsee homogeeninen sähkökenttä, jonka voimakkuus voidaan laskea jakamalla levyjen potentiaaliero niiden etäisyydellä. Esimerkiksi 1 kV/m sähkökenttä vallitsee levyjen välillä, jotka ovat 1 metrin etäisyydellä toisistaan ja joiden välillä on 1000 V potentiaaliero. [12] Kuvassa 8 on esitetty tällainen kondensaattorirakenne.



Kuva 8 Kahden levyn välinen sähkökentän voimakkuus [12]

Käytännössä levyn pään ulkopuolella sähkökenttä taipuu, jolloin kenttä on siellä epähomogeeninen.

Jos on tilanne, että tarkastelupisteen lähellä on useita sähkökentän lähteitä, niin sähkökentänvoimakkuus tarkasteltavassa pisteessä on summakenttä eri sähkökentän lähteiden kentistä. Summakenttä muodostuu kaikkien lähteiden synnyttämistä sähkökenttävektoreista. Tämä on tilanne esimerkiksi kolmivaiheverkossa, jossa summakenttä muodostuu kaikkien eri vaiheiden sähkökenttävektoreista, joilla on eri suuruus, suunta ja vaihe-ero toisiinsa nähden. Suomessa käytössä olevalla 50 Hz taajuudella sähkökentän voimakkuus vaihtelee sinimuotoisesti ja suunta muuttuu 10 ms välein. Ratajohtoverkossa on samankaltainen tilanne useamman sähköistetyin radan ollessa rinnakkain, kun kaikkien ratojen jännitteiset ajojohtimet muodostavat omat kenttensä, jotka summautuvat tarkastelupisteessä. Eri ratojen ajojohtimet saattavat olla myös eri vaiheissa, mikä vaikuttaa huomattavasti kentänvoimakkuuksien summautumiseen. Tästä kenttien summautumisesta riippuen kentänvoimakkuus voi siis olla jopa pienempi jännitteisen johtimen lähellä, kuin kauempana johtimesta.

Sähkökentän deformaatio

Kun sähkökenttään tuodaan sähköä johtava kappale, niin sähköstaattisen induktion johdosta kappaleen sähkövaraukset järjestyvät uudelleen kappaleen pinnalle. Tätä ilmiötä kutsutaan myös influenssiksi. Pintavaraukset muodostavat sähkökentän, joka muuttaa eli deformoi alkuperäistä kenttää. Deformaation voimakkuuteen vaikuttaa kappaleen asento, koko, muoto ja sähköiset ominaisuudet. Maadoitetut kohteet taivuttavat sähkökenttää ja luovat siihen varjostuksia, joissa kentänvoimakkuus on heikompi. [12]

Sähkökenttä ratajohdon ympäristössä

Kentänvoimakkuuteen jännitteisen johtimen lähellä vaikuttavat toiset johtimet ja maadoitetut rakenteet. Ratajohdolla tällaisia ovat paluujohdin, vastajohdin, M-johdin, ratapylväs- ja kannatinrakenteet sekä muut vastaavat rakenteet. Tämä luo alueita, joissa kenttä on huomattavasti heikompi kuin ympärillä. Tämä asettaa haastetta sähkökentän mittaamiseen perustuvalla jännitteen toteamisella, koska sähkökenttä voi lähellä jännitteistä johdinta olla jossain kohdassa huomattavastikin heikompi, kuin toisessa kohdassa. Myös mittajaan keho on johtava rakenne ja siten vääristää sähkökenttää, erityisesti tässä työssä tarkasteltavan kädessä pidettävän laitteen kaltaisilla laitteilla mitattaessa. Ilmastolliset olosuhteet kuten lämpötila ja ilmankosteus vaikuttavat myös saatavaan tulokseen, jonkin verran. [9] Sähkökentänvoimakkuutta ratajohdolla voidaan arvioida laskennallisella mallinnuksella, jolla saadaan käsitys maadoitettujen rakenteiden aiheuttamista varjostuksista. Näin voidaan arvioida kohtia, joissa sähkökenttää mittaamalla saadut tulokset voivat olla harhaanjohtavia. Tätä tarkastellaan enemmän luvussa 5.

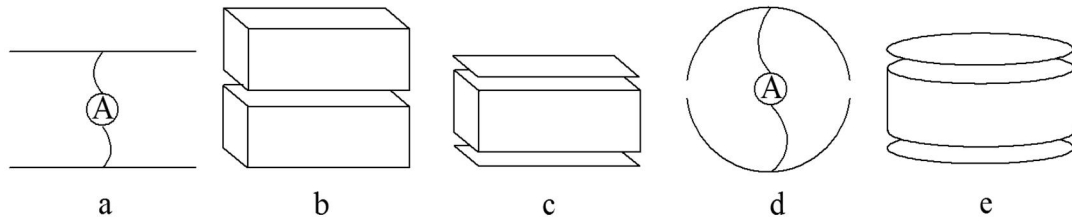
3.1.2 Sähkökentänvoimakkuuden mittaaminen

Sähkökentänvoimakkuus on vektorisuure, jonka arvo saadaan eri vektorikomponenttien resultanttina. Sähkökentänvoimakkuus on suurimmillaan suoraan johdon alla ja pienee nopeasti johdosta etäännyttäessä. Pientaajuisten sähkökenttien mittaamiseen on olemassa IEC-standardi, IEC 60833 ja myös standardi IEEE Std 644–1994, joissa annetaan ohjeita sähkökentän mittaamiseen [9]. Tässä työssä sähkökentän mittaamisen tarkkuus ei kuitenkaan ole kovin olennaista ja mittausten olosuhteet vaihtelevat suuresti. Lisäksi työssä tutkittavaa JET-laitetta käytetään aina kädestä, jolloin mittajaan keho vääristää kenttää, mikä vaikuttaa saatavaan tulokseen huomattavasti anturin tarkkuutta enemmän. Näin ollen voidaan tyytyä toteamaan tällaisten standardien olemassaolo ja käyttää niiden mukaan mitattuja tunnettuja mittaustuloksia vertailuarvoina.

Anturityypit

Sähkökentän voimakkuutta voidaan mitata erilaisilla antureilla. Anturityyppejä on kolmenlaisia, passiivisia levytyyppisiä (dipolianturit), kapasitiivistyyppisiä ja sähköoptisia. Anturit voidaan myös jakaa maan referenssikentästä riippuviin ja riippumattomiin. Näistä maan referenssikentästä riippumattomat ovat yleisempiä ja myös tässä työssä tarkastelussa.

Yleisin on maan referenssikentästä riippumaton levytyyppinen anturi, dipolianturi. Dipolianturit koostuvat kahdesta levystä, joihin sähkökenttä aiheuttaa erisuuret varaukset. Levyjen väliin syntyy jännite, jonka aiheuttama sähkövirta syntyy kun levyt on yhdistetty toisiinsa. Levyjen välistä jännitettä, varausta tai virtaa voidaan seurata. Anturi mittaa tietynsuuntaista kentänvoimakkuusvektorin komponenttia sen mukaan miten se on suunnattu. [9] Kuvassa 9 on esitettyä erityyppisiä dipoliantureita.



Kuva 9 Erityyppisiä dipoliantureita [10]

Seuraavassa esitetään miten kentänvoimakkuus saadaan anturin virtayhtälöstä. Toisen levyn varaus on $+q$ ja toisen $-q$. Anturin virralle saadaan sijaiskytkentä ja yhtälö 4 Maxwellin 1. yhtälöstä lähtien. [10]

$$i(t) = \varepsilon \int_A \left(\frac{d e}{d t} \right) dA = C \frac{du}{dt} + \frac{u}{R} = i_c + i_r \quad (4)$$

missä ε on permittiviteetti, e mitattava kentänvoimakkuus, u anturin jännite, C anturin kapasitanssi ja A anturin elektrodin tehollinen pinta-ala.

Jos kapasitiivinen virta jätetään huomiotta ja kentänvoimakkuuden derivaatta ajan suhteen tietyllä hetkellä on vakio koko anturin pinnalla, saadaan yhtälö 5.

$$u = R i_r = \varepsilon R A \frac{de}{dt} \quad (5)$$

ja tästä integroimalla anturin jännite saadaan sähkökentän voimakkuus.

$$e = \frac{1}{\varepsilon R A} \int u dt \quad (6)$$

Resistiivinen virta voidaan jättää huomiotta, kun anturia ei kuormiteta vastuksella

$$u = \frac{\varepsilon A}{C} e \quad (7)$$

Anturin jännite on nyt suoraan verrannollinen kentänvoimakkuuteen.

Anturin tehollinen pinta-ala $A = A_{\text{eff}}$ riippuu anturin rakenteesta.

Tyypillisesti kentänvoimakkuus lasketaan mitatusta virran tehollisarvosta. Anturia ei kuormiteta ja varauksen tehollisarvo on $Q = k E$, missä E on kentän voimakkuuden tehollisarvo anturin akselin suuntaan. Elektrodien välisen virran tehollisarvo on $I = \omega Q$, missä ω on kulmataajuus. Kerroin k riippuu anturin geometriasta.

Anturin asento vaikuttaa suorakulmaisen anturin näyttämään, jos akselia vastaan kohtisuora kentänvoimakkuuden komponentti on huomattava. Lieriö ja palloantureilla ei ole tätä ongelmaa. Yksiakselisella anturilla, joka mittaa yhtä kentänvoimakkuusvektoria kerrallaan voidaan mitata kentänvoimakkuuden maksimiarvo kääntelemällä anturia eri suuntiin. [10]

Kapasitiivisilla palloantureilla voidaan mitata kentänvoimakkuusvektorin komponentteja samanaikaisesti ja näin saada kentänvoimakkuuden maksimiarvo. Kaksi- tai kolmiakselisissa antureissa on neljä tai kuusi toisistaan eristettyä segmenttiä. Segmentit on yhdistetty kondensaattoreiden avulla yhteen pisteeseen. Kentänvoimakkuus on laskettavissa pallon pinnan varausjakaumasta. [10]

Sähköoptiset anturit perustuvat Pockels- ja Kerr-ilmiöihin, joita voidaan käyttää sähkökentän mittauksessa. Kun polarisoitunut valo johdetaan sähkökentässä olevan sähköoptisen kennon läpi, sen polarisaatio muuttuu. Kennot ovat pienempiä kuin edellä käsitellyt anturityypit. [10]

3.1.3 Jännitteen kytkeytyminen

Vaikka johdin olisi erotettu jännitesyötöstä, siihen voi kytkeytyä jännite muista johtimista. Johtoon voi kytkeytyä jännite induktiivisesti virrallisista johtimista tai kapasitiivisesti jännitteellisistä johtimista. Tämä on otettava ratatöissä huomioon ja tämän vuoksi työmaadoitukset ovat välttämättömiä.

Induktiivinen

Virrallinen johto luo ympärilleen magneettikentän Amperen lain mukaan. Vaihtovirralla virran kulkusuunta johdolla vaihtelee, jolloin johtoa ympäröivä magneettikenttä on jatkuvassa muutostilassa. Magneettikentän muutos johdinsilmukan lävitse indusoi Faradayn lain mukaan sähkömotorisen voiman eli $smv:n$. Indusoituvan $smv:n$ polariteetti on aina sellainen, että se pyrkii aiheuttamaan silmukkaan virran, joka kumoaisi ulkoisen magneettikentän muutoksen.

Ratajohdossa kulkeva 50 Hz vaihtovirta indusoi siis magneettikentän välityksellä vierekkäisen raiteen jännitteestä erotettuun maadoittamattomaan ratajohtoon $smv:n$. Indusoituvan jännitteen suuruus riippuu johtojen etäisyyksistä toisistaan, yhdensuuntaisen osan pituudesta ja käytössä olevien johtimien virroista ja reaktansseista. Indusoituvan jännitteen suuruus on yleensä noin 1-5 kV. Tätä kutsutaan usein myös latausjännitteeksi. Indusoituvan jännitteen vuoksi ratajohdolla on oltava maadoituksia riittävän tiheässä. [8]

Kapasitiivinen

Kuten kappaleessa 3.1.1 on käsitelty, jännitteellinen johdin aiheuttaa ympärilleen sähkökentän. Tämä kenttä voi aiheuttaa viereiseen johtimeen varauksen kapasitiivisesti, koska erotettu johdin on myös kapasitiivinen rakenne jännitteisen johtimen muodostamassa sähkökentässä. Kyseessä on siis sama ilmiö, jota käytetään hyödyksi sähkökentän mittaamisessa. Kytkeytyneen jännitteen suuruus riippuu johtojen keskinäisestä asemasta ja jännitteestä.

3.2 Sähköradan sähkökentän laskennallinen mallinnus ja mittaukset

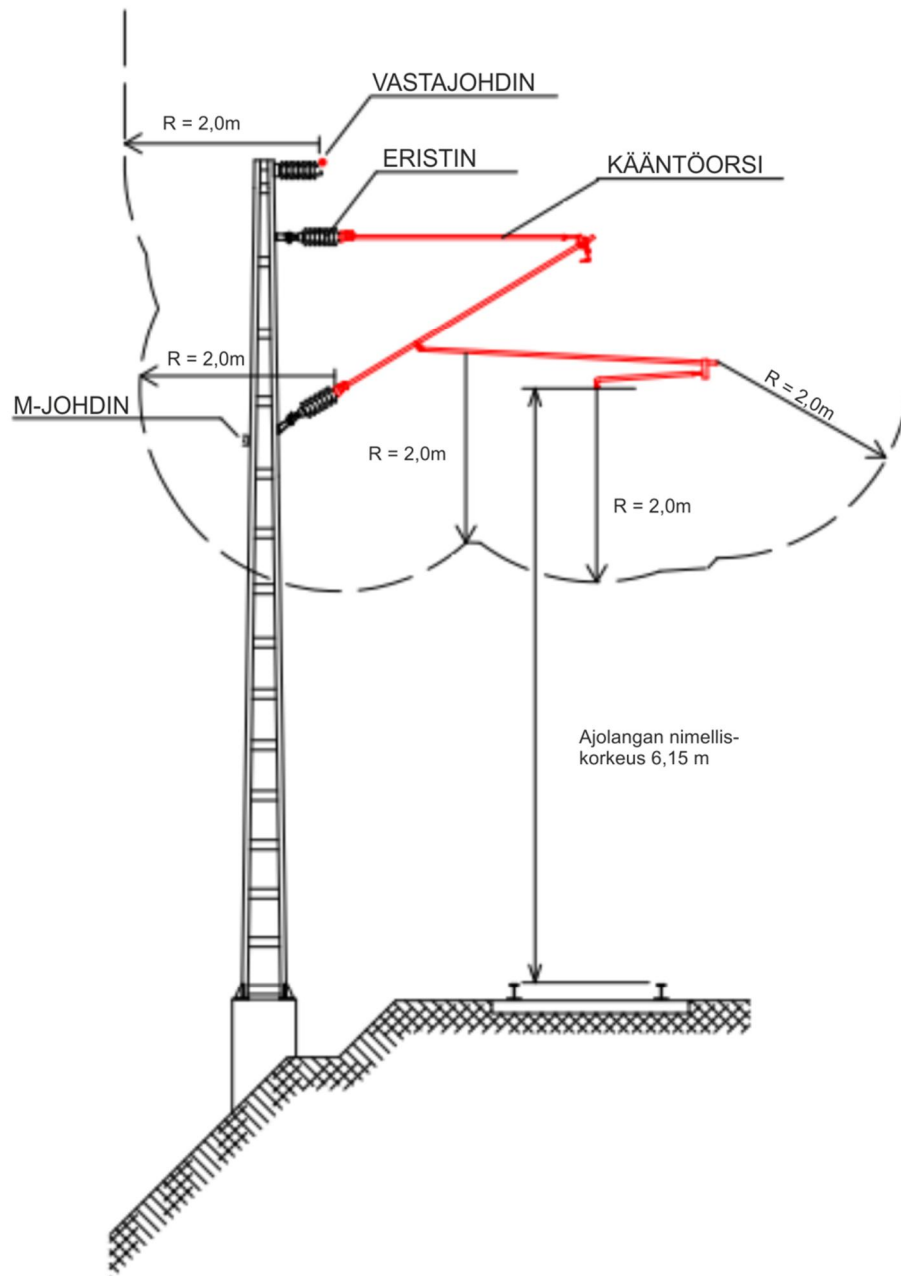
3.2.1 Laskennalliset mallinnukset

Sähkökenttiä voidaan laskea numeerisilla laskentamenetelmillä. Nämä menetelmät perustuvat Poissonin ja Laplacen yhtälöiden ratkaisemiseen. Tunnettaessa riittävästi reunaehtoja voidaan tarkasteltavan alueen jokaisessa pisteessä laskea kentänvoimakkuus, sähkövuon tiheys ja potentiaali. Yleisesti käytetty menetelmä on elementtimenetelmä, jossa tarkasteltava alue jaetaan pieniin osa-alueisiin, elementteihin. Jokaisessa elementissä tarkasteltavaa kenttäsuuretta kuvaa funktio. Tarkasteltavalle alueelle lasketaan kokonaisenergia, jonka minimiarvoa etsitään valitsemalla funktioiden kertoimet oikein. Tarkastelun tarkkuutta voidaan lisätä elementtien kokoa pienentämällä. [10]

Tällaisella menetelmällä voidaan mallintaa ratajohdon ympärilleen luomaa sähkökenttää ja siihen maadoitetuista kohteista aiheutuvia varjostuksia. Näin saadaan tietoa siitä miten sähkökenttä käyttäytyy ratajohdon ympäristössä ja voidaan arvioida kohtia, joissa JET-laitteen mittaustulos saattaisi olla harhaanjohtava.

Ratajohdon aiheuttamaa sähkökenttää mallinnettiin Comsol-ohjelmistolla. Sen avulla luotiin 2D poikkileikkauskuva pylväsvälillä vapaassa ilmatilassa kulkevasta ratajohdosta. Malleihin rakennettiin ratajohdon komponentit sopiville etäisyyksille toisistaan ja annettiin niille sopivat jännitearvot. Mallinnuksia tehtiin yksi ja useampiraiteisista tilanteista. Ne tehtiin pääosin yleisemmällä 25 kV järjestelmällä, mutta myös 2x25 kV järjestelmä mallinnettiin. Tilanteista tehtiin erilaisia malleja vaihtelemalla komponenttien jännitteitä vastaamaan erilaisia tilanteita, kuten indusoituneita jännitteitä ja erilaisia maadoitustilanteita. Myös aitojen vaikutusta sähkökentän jakaumaan tutkittiin.

Mallinnukset tehtiin pylväiden välillä olevalle pylväättömälle ratajohtorakenteelle. Tällöin sähkökenttään vaikuttavat vain johtimet, eivät pylväät. Oheisessa kuvassa 10 on havainnollistettuna ratajohdon rakenteen poikkileikkaus 25 kV järjestelmässä.

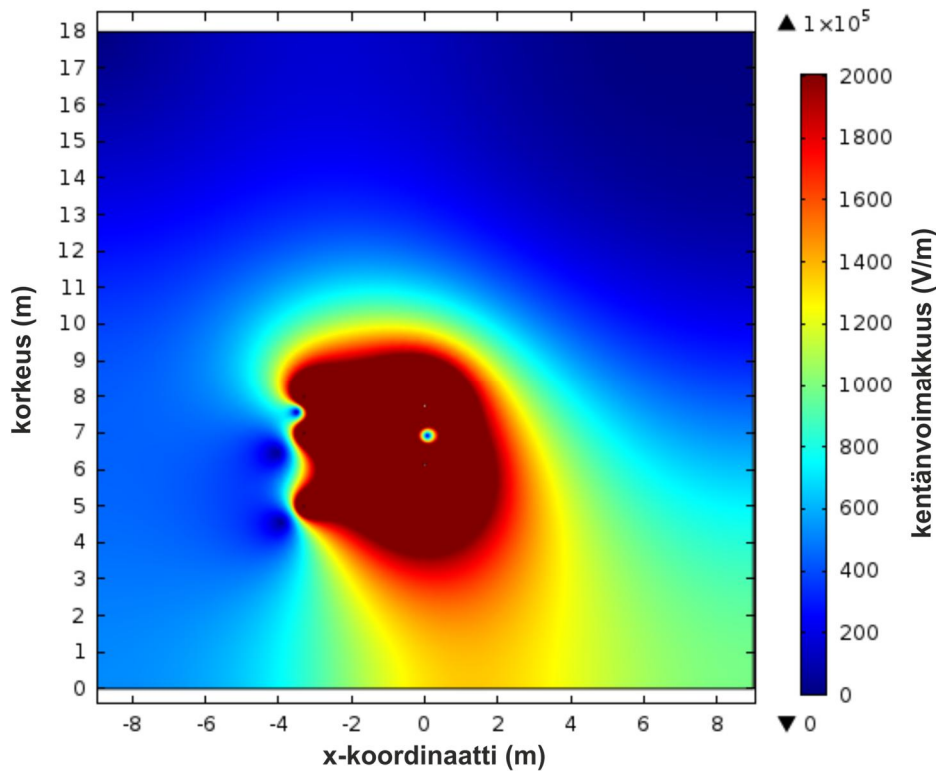


Kuva 10 Sähkötien poikkileikkaus 25 kV järjestelmässä [8]

Yksittäisraiteella pylväslinja ja siten myös muut johtimet on mallinnettu ajojohtimen vasemmalla puolella, kuvan 10 mukaisesti. Ajojohdin on mallinnettu kohtaan $x = 0$ m, kuuden metrin korkeuteen. Maataso yksinkertaistettiin mallinnukseen siten, että sitä kuvaa tasainen ympäriinsä jatkuva taso $y = 0$ m koordinaatissa.

Perustilanteet

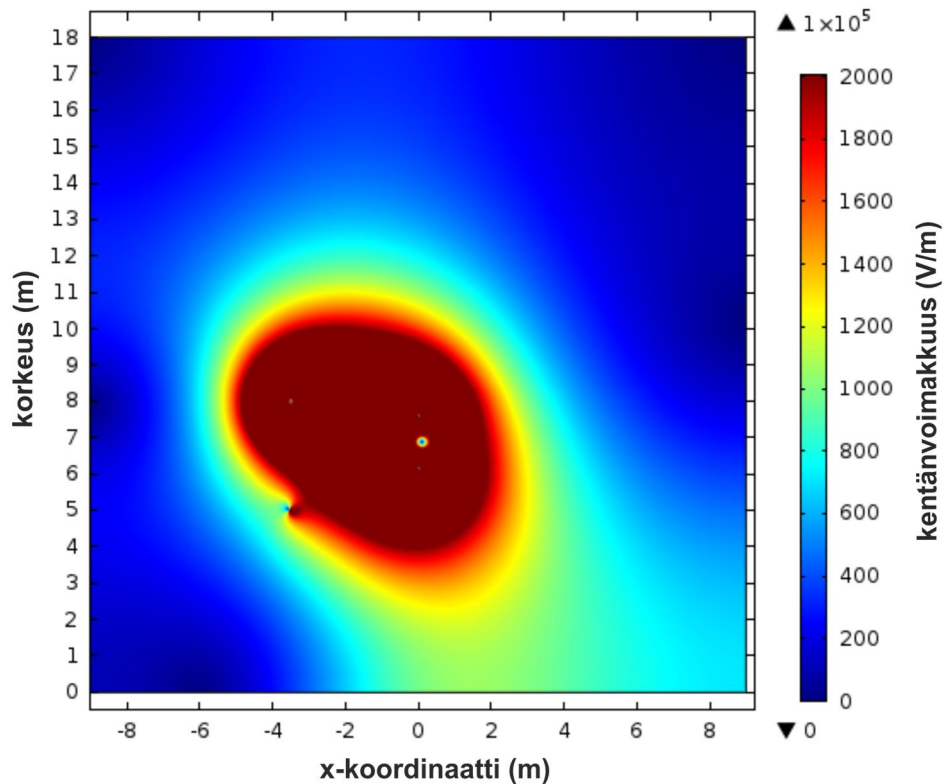
Suurin osa sähköradasta on 25 kV järjestelmällä toteutettua yksittäisrataa. Kuvassa 11 on mallinnettu tämän tilanteen aiheuttama sähkökenttä. Ajojohdin ja kannatinköysi ovat x-koordinaattiin 0 ajatellun radan päällä ja muut johtimet ajatellun pylväslinjan kohdalla x-koordinaatissa -3,3.



Kuva 11 25 kV järjestelmän sähkökentänvoimakkuus yksittäisraiteen tapauksessa

Kuvasta 11 näemme miten sähkökenttä jakautuu normaalilla avorataosuudella. Kenttä joka muodostuu jännitteisten ajojohtimen ja kannatinköyden ympärille ei jakaudu symmetrisesti kaikkiin suuntiin. Kentänvoimakkuus maanpinnan suuntaan on huomattavasti suurempi, kuin suoraan ylöspäin. Sivuttaissuunnissa sähkökenttä on oikealla puolella tasaisesti heikkenevä, kun taas vasemmalla puolella paluujohdot ja M-johdin vaikuttavat kentän muodostumiseen. Niiden johdosta syntyy näiden johtimien taakse kuvassa vasemmalla näkyviä heikon kentänvoimakkuuden alueita. Sähkökenttä vasemmalla puolella johtimien takana on myös selvästi oikeata puolta heikompaa. Tämä johtaa siihen, että etäisyyden arviointi johdosta sähkökentän perusteella ei ole tarkkaa. Sähkökentänvoimakkuus on kuitenkin huomattavan suuri kaikkialla johdon läheisyydessä, joten sen jännitteisyys on helppo tunnistaa mittareilla ja siten myös JET-laitteella.

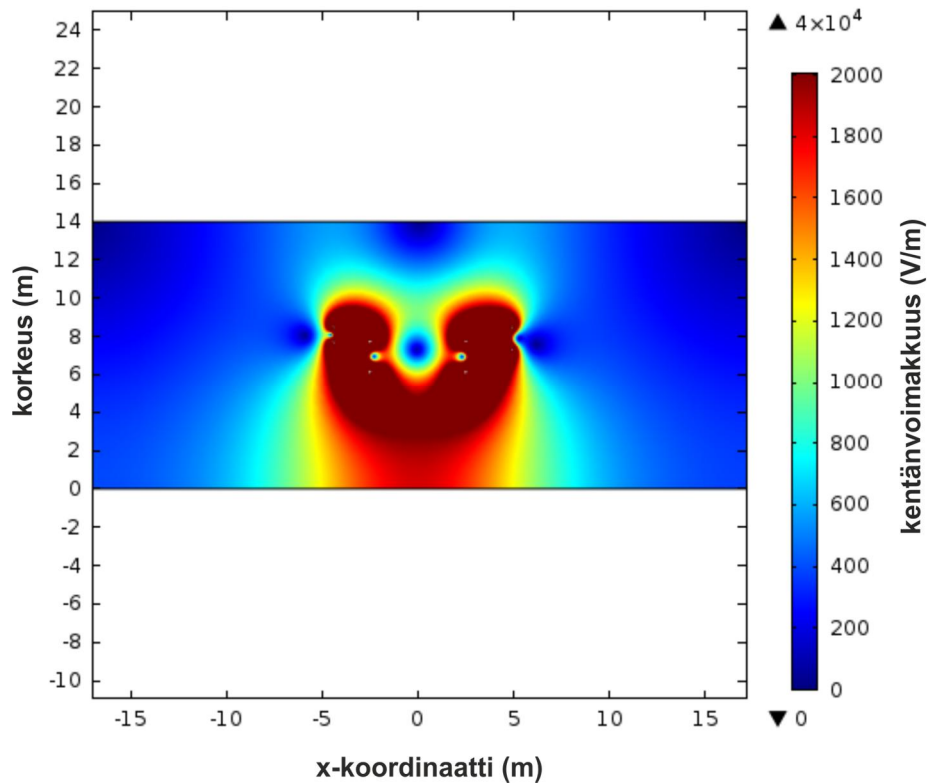
Toinen käytössä oleva sähköistysjärjestelmä on 2x25 kV järjestelmä. Seuraavassa kuvassa 12 on mallinnettu sen aiheuttamaa sähkökenttää yksittäisellä radalla. Ratajohdon komponentit on sijoitettu vastaavasti kuten kuvassa 10.



Kuva 12 2x25 kV järjestelmän sähkökentänvoimakkuus yksittäisraiteen tapauksessa.

Kuvasta 12 näemme, että sähkökenttä 2x25 kV järjestelmässä poikkeaa luonnollisesti 25 kV järjestelmän kentästä. Eron aiheuttaa pääasiassa vastajohdin, jossa on -25 kV potentiaali. Ajojohtimen oikealla puolella kenttä muistuttaa suuresti 25 kV järjestelmän luomaa kenttää. Vasemmalla puolella taas kenttä on vastajohtimen ympärillä voimakas. M-johdin aiheuttaa taakseen varjostusta ja vasemmalla puolella kentänvoimakkuudet ovat oikeata puolta heikommat. Kentänvoimakkuudet maanpinnan lähellä ovat tässä järjestelmässä 25 kV järjestelmää heikommat, erityisesti vasemmalla puolella. Kentänvoimakkuus on kuitenkin riittävän suuri ajojohtimen jännitteisyyden havaitsemiseen.

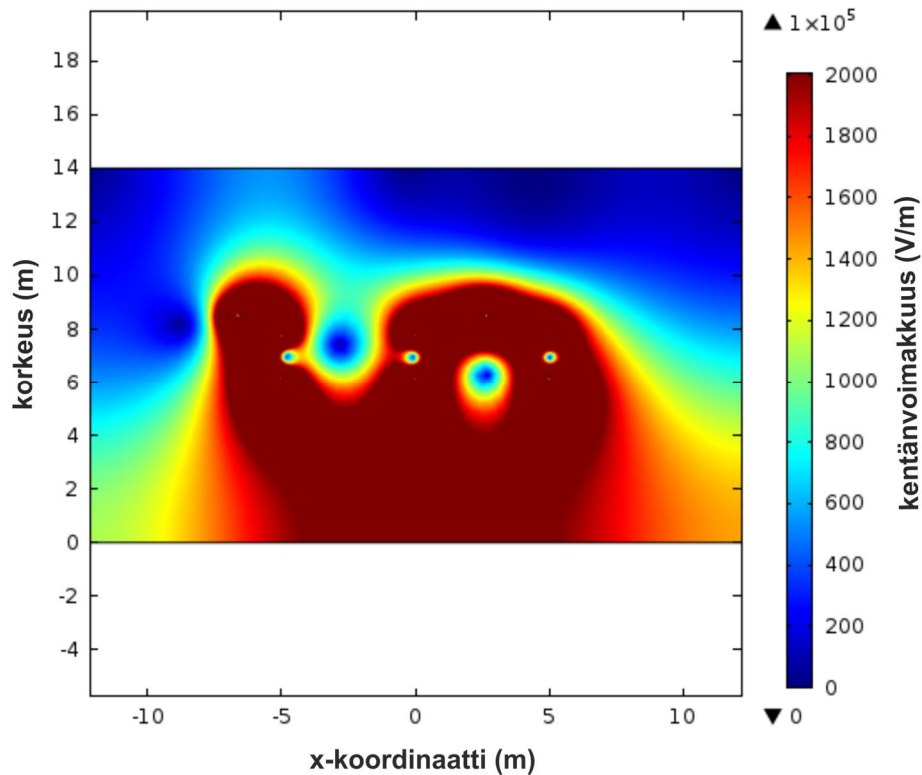
Seuraavaksi tarkastelemme tilanteita, joissa on enemmän kuin yksi sähköistetty rata rinnakkain. Tällaisia tilanteita esiintyy esimerkiksi kaksoisradalla ja ratapihoilla. Kuvassa 13 on mallinnettu kahden rinnakkaisen radan tilannetta. Ajojohtimet ovat kuuden metrin korkeudella x-koordinaateissa -2,5 ja 2,5. Muut johtimet ovat molemmille puolille ajateltujen pylväslinjojen kohdalla x-koordinaateissa -4,4 ja 4,9. Tässä tapauksessa ei ole M-johtimia ja molempien ratojen jännitteet ovat samanvaiheiset.



Kuva 13 25 kV järjestelmän sähkökentänvoimakkuus kahden rinnakkaisen radan tapauksessa.

Kuvasta 13 havaitaan, miten kaksi rinnakkaista johtoa aiheuttavat symmetrisen sähkökentän. Tämä johtuu siitä, että johtimet on sijoitettu symmetrisesti ja jännitteet ovat yhtä suuret. Ajojohtimien väliin syntyy hyvin pienen kentänvoimakkuuden alue, kuten myös paluujohtimien taakse. Kentänvoimakkuudet maanpinnan lähellä ovat korkeammat kuin aiemmissa tapauksissa.

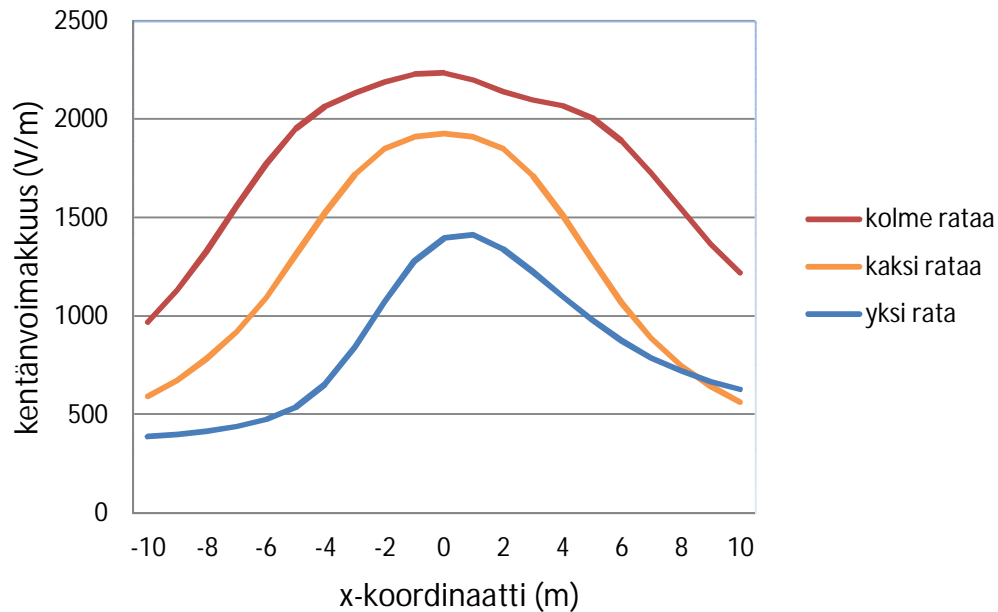
Seuraavassa tapauksessa on mallinnettu kolmen rinnakkaisen radan tilannetta kuvassa 14. Johtimet on sijoitettu samaan pylväsrakenteeseen ja kuvassa 14 oikeanpuoleisilla johtimilla on yhteiset paluujohtimet, jotka sijaitsevat kyseisten ajojohtimien välissä. Ajojohtimet sijaitsevat x-koordinaateissa -5, 0 ja 5. Tilanteen pylväsrakenne on esitetty kuvassa 5.



Kuva 14 25 kV järjestelmän sähkökentänvoimakkuus kolmen rinnakkaisen radan tapauksessa.

Kuvasta 14 havaitaan että kentästä ei muodostu symmetristä, kuten edellisessä tapauksessa kahdella rinnakkaisella radalla. Tämä johtuu raiteiden 2 ja 3 yhteisistä paluujohtimista. Eri ratojen ajojohtimien välille muodostuu voimakkuudeltaan lähellä nollaa olevia kentänvoimakkuuden alueita. Johtimet ovat samassa potentiaalissa, jolloin niiden välillä ei ole potentiaalieroja ja siten myös kentänvoimakkuus niiden välissä on lähellä nollaa. Kentänvoimakkuus nousee melko tasaisesti molemmista suunnista lähestyttäessä ja on yleisesti ottaen korkea kaikkialla ratojen lähellä, joten jännitteisten kohteiden läheisyys on helppo todeta.

Kuvassa 15 on esitettyä kuvaajat perustilanteiden sähkökentänvoimakkuuksista yhden, kahden ja kolmen raiteen tilanteissa. Yhden radan tilanteessa ajojohdin on x-koordinaatissa 0, kahden radan tilanteessa x-koordinaateissa -2,5 ja 2,5 sekä kolmen radan tilanteessa x-koordinaateissa -5, 0 ja 5.



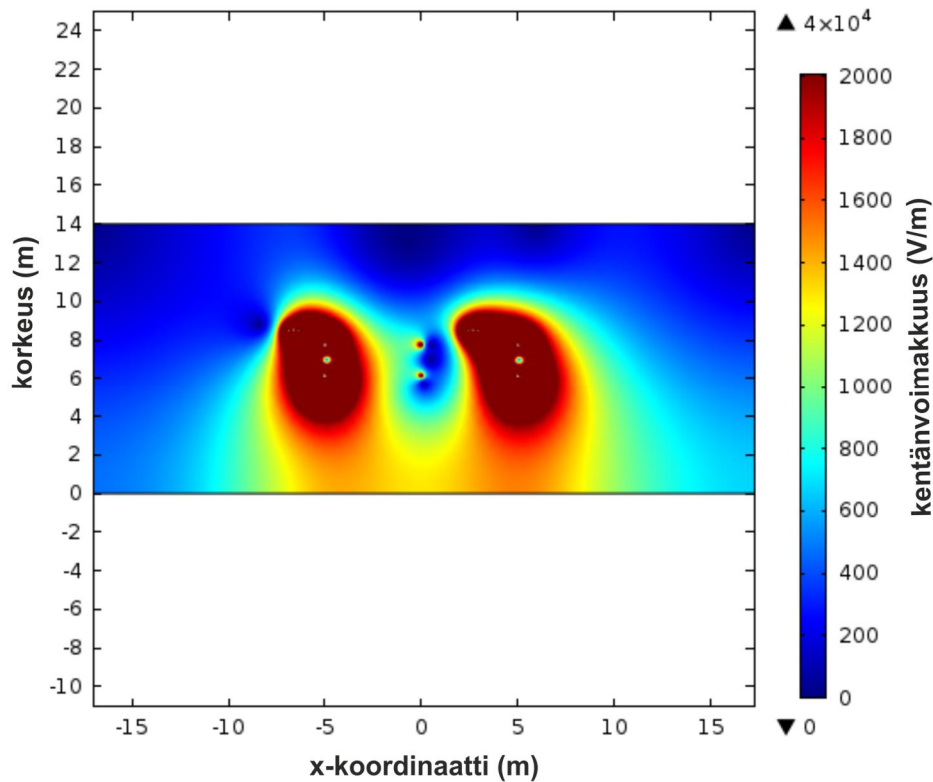
Kuva 15 25 kV järjestelmä, kentänvoimakkuus 2 m korkeudella 1,2 tai 3 rinnakkaisen radan tapauksessa.

Kuvasta 15 havaitaan miten sähkökentänvoimakkuus jakautuu ja kuinka suuri se on eri perustilanteissa sähköradan ympäristössä. Kaikissa tapauksissa eri radat ovat samassa vaiheessa. Perustilanteista tehdyistä mallinnuksista saadaan peruskäsitys siitä, millainen on sähkökenttä sähköradan ympäristössä ja mitkä kohteet siihen vaikuttavat. Jatkossa keskitytään enemmän poikkeustapauksiin.

Poikkeavat tilanteet

Seuraavaksi tarkastellaan tilanteita, joissa jännite ei kaikissa johtimissa ole normaali käyttöjännite 25 kV vaan jossain johtimessa vaikuttaa pieni indusoitunut jännite tai jokin johtimista on maadoitettu. Johtimissa voi esiintyä niihin kytkeytyneitä jännitteitä, kuten on käsitelty kappaleessa 3.3.

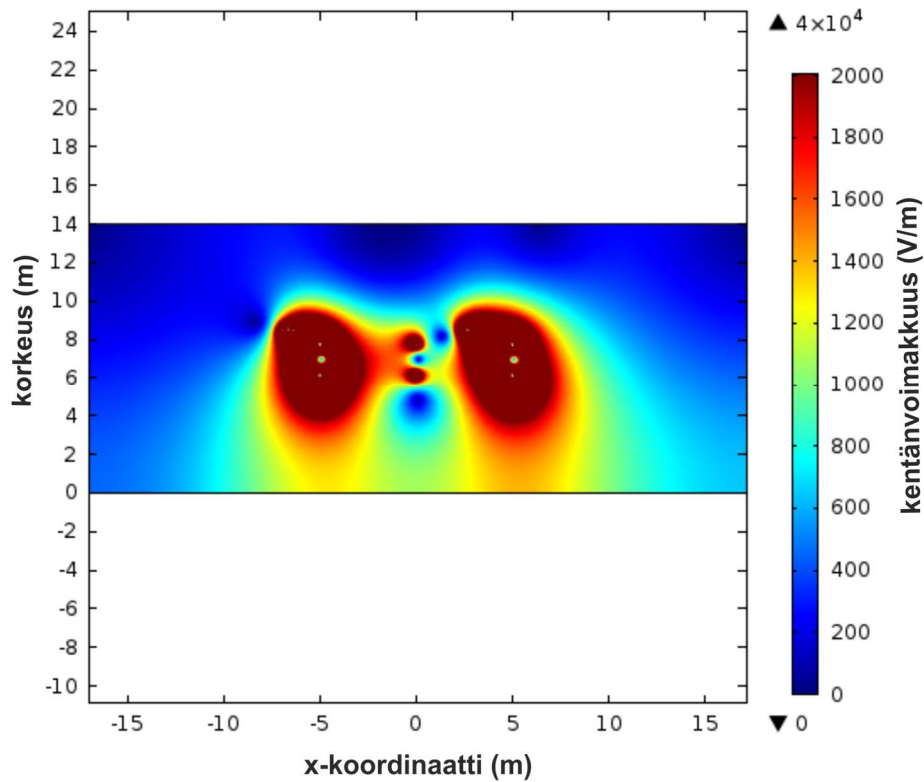
Tässä tilannetta on havainnollistettu kolmen rinnakkaisen johdon tilanteessa. Kuvassa 16 on tilanne, jossa kolmen rinnakkaisen radan tilanteessa keskimäinen ajojohdin on irrotettu jännitesyötöstä. Siihen on kuitenkin toisista jännitteellisistä johtimista indusoitunut 5 kV jännite. Ajojohtimet sijaitsevat x-koordinaateissa -5, 0 ja 5.



Kuva 16 25 kV järjestelmän sähkökentänvoimakkuus kolmen rinnakkaisen radan tapauksessa, jossa keskimmäisen ajojohtimen jännite on 5 kV.

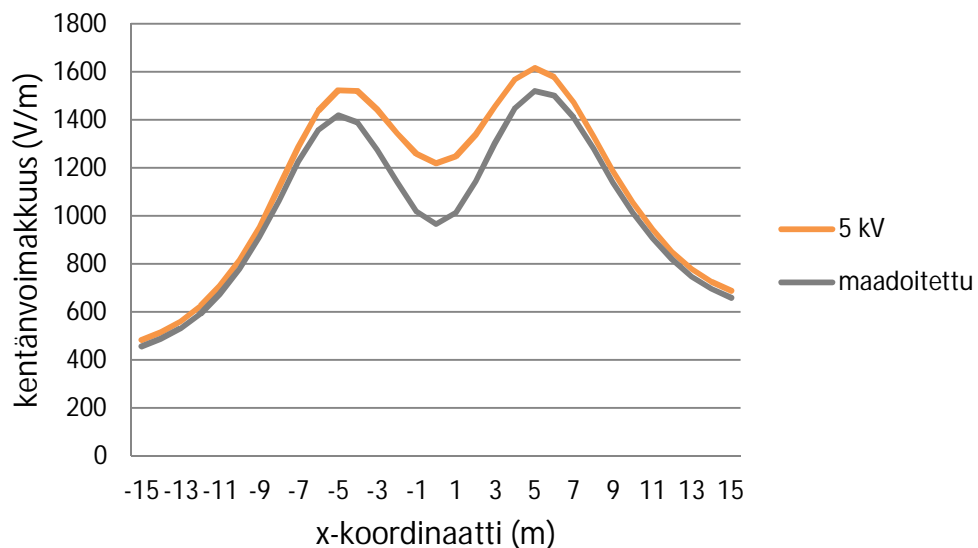
Kuvasta 16 nähdään kuinka sähkökenttä on huomattavasti erilainen kuin kuvassa 14. Käyttöjännitteisten johtimien alla kenttä on edelleen voimakas, mutta huomattavasti heikompia kuin aiemmassa tilanteessa. Kentänvoimakkuus laskee muutamilla sadoilla V/m siirryttäessä 25 kV jännitteisten johtimien alta 5 kV indusoituneen johdon alle.. Sähkökentänvoimakkuus keskimmäisen johtimen alapuolella on 300 V/m pienempi kuin oikeanpuoleisen johtimen alla ja 400 V/m pienempi kuin vasemmanpuoleisen johtimen alla. Tässä tilanteessa sen havaitseminen, että keskimmäisessä johtimessa on pienempi jännite, on melko selvää. Kyseisen jännitteen suuruuden tulkinta muuttuu kuitenkin jo hankalaksi.

Verrataan tätä tilannetta siihen, että keskimmäinen johto olisi maadoitettu. Kuvassa 17 on muuten sama tilanne, mutta keskimmäinen johdin on maadoitettu työskentelyä varten.



Kuva 17 25 kV järjestelmän sähkökentänvoimakkuus kolmen rinnakkaisen radan tapauksessa, jossa keskimäinen ajojohdin on maadoitettu.

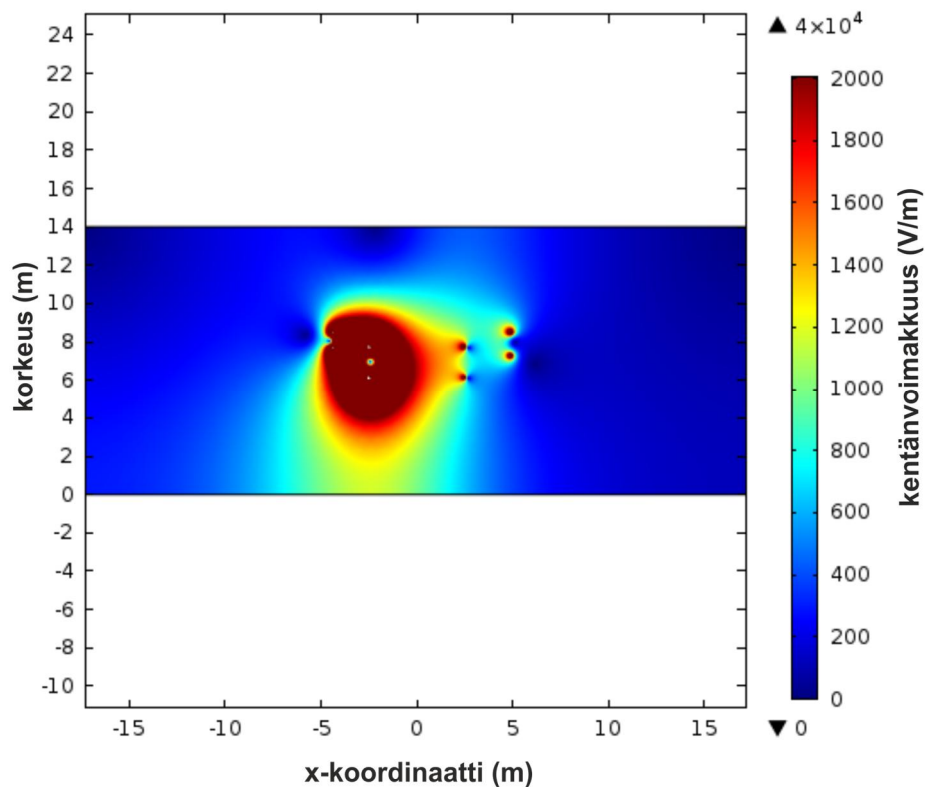
Kuvia 16 ja 17 vertaamalla havaitaan, että ero on kuvista havaittavissa, muttei kovin suuri. Yhdistämällä samaan kuvaajaan molempien kentänvoimakkuudet kahden metrin korkeudella, asiaa voidaan tutkia tarkemmin. Näin on tehty kuvassa 18.



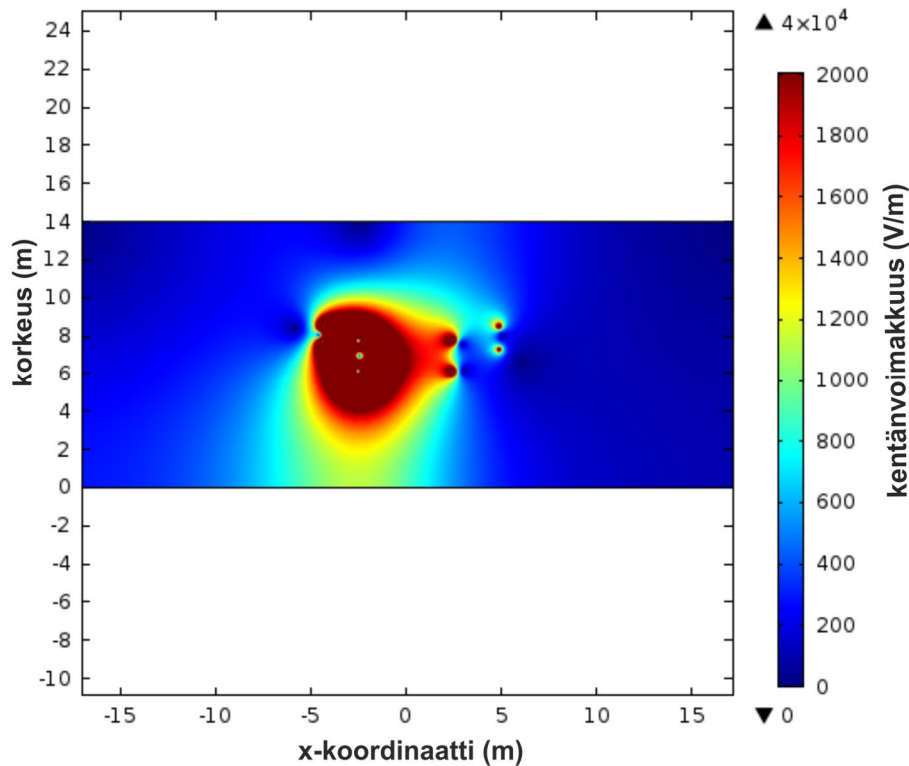
Kuva 18 25 kV järjestelmän sähkökentänvoimakkuus kolmen rinnakkaisen radan tapauksessa. Kaksi tilannetta, joissa toisessa keskimäinen ajojohdin on maadoitettu ja toisessa siinä on 5 kV jännite. Ajojohtimet sijaitsevat x-koordinaateissa -5, 0 ja 5.

Kuvassa 18 havaitaan, että ero kentänvoimakkuuksissa suoraan keskimmäisen johtimen alla näiden kahden tilanteen välillä on noin 200 V/m. Mallinnuksista saaduista tuloksista saadaan tarkat luvut 5 kV tilanteelle 1218 V/m ja maadoitetulle tilanteelle 965 V/m, joiden ero siten on 253 V/m. Ero kentänvoimakkuuksissa ei siis ole kovin suuri, mikä vaikeuttaa tilanteen tulkintaa läheltä maan pintaa.

Sama asia käy ilmi myös tutkittaessa kahden rinnakkaisen radan tapausta, jossa toisella radalla on erisuuruisia kytkeytyneitä jännitteitä tai se on maadoitettu. Kuvissa 19 ja 20 on esitetty tilanteet, joista toisessa oikeanpuoleisessa ajojohtimessa on 2 kV jännite ja toisessa oikeanpuoleinen johdin on maadoitettu. Ajojohtimet sijaitsevat x-koordinaateissa -2,5 ja 2,5.

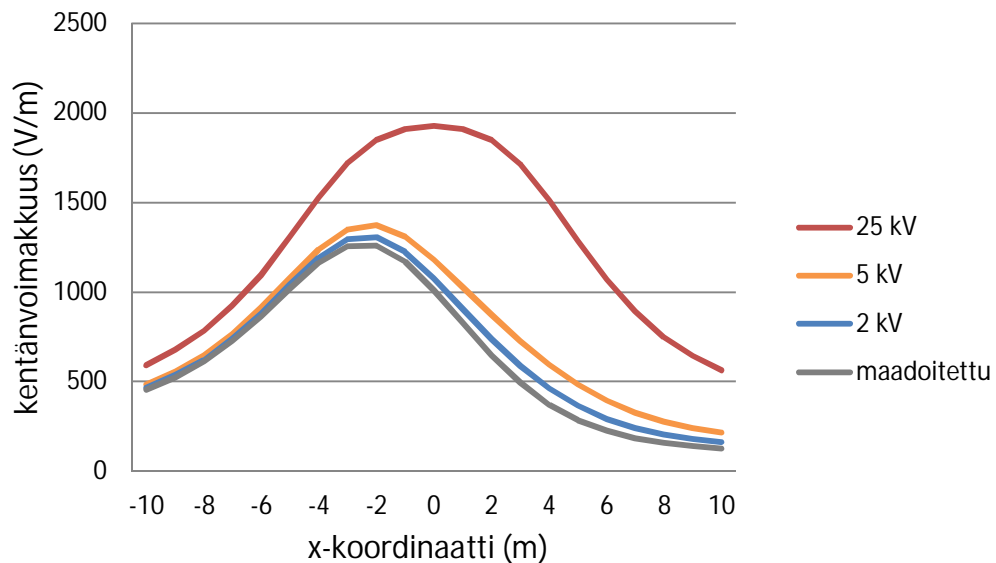


Kuva 19 25 kV järjestelmän sähkökentänvoimakkuus kahden rinnakkaisen radan tapauksessa, jossa oikeanpuoleisessa ajojohtimessa on 2 kV jännite.



Kuva 20 25 kV järjestelmän sähkökentänvoimakkuus kahden rinnakkaisen radan tapauksessa, jossa oikeanpuoleinen ajojohdin on maadoitettu.

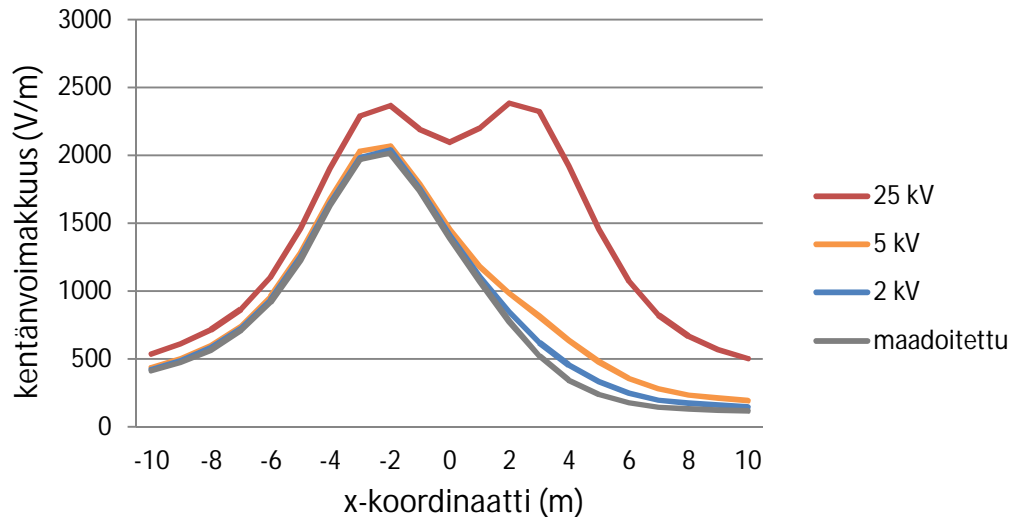
Kuvista 19 ja 20 havaitaan, että kentät ovat molemmissa tapauksissa hyvin samankaltaisia. Näiden tilanteiden erottaminen toisistaan tulee kuvista arvioiden olemaan käytännön mittauksissa vaikeaa. Kuvassa 21 on esitettyä kentänvoimakkuuksia kahden rinnakkaisen johdon tapauksessa kun vasemmanpuoleisessa johtimessa on normaali 25 kV ja oikeanpuoleisessa johtimessa jännite vaihtelee.



Kuva 21 25 kV järjestelmän sähkökentänvoimakkuus kahden rinnakkaisen radan tapauksessa kahden metrin korkeudelta. Eri tilanteet kuvaavat oikeanpuoleisen radan ajojohtimen erisuuruisia jännitteitä. Ajojohtimet sijaitsevat x-koordinaateissa -2,5 ja 2,5.

Kuvassa 21 on esitetty kuvissa 19 ja 20 esiintyneet tilanteet joissa oikeanpuoleisessa johtimessa on 2 kV jännite tai se on maadoitettu. Kuvassa on esitetty lisäksi tilanteet, joissa oikeanpuoleisessa johtimessa on 25 kV tai 5 kV. Kuva havainnollistaa hyvin sen, että kentänvoimakkuudet ovat muissa kuin 25 kV tilanteessa hyvin samansuuruiset lähellä maan pintaa.

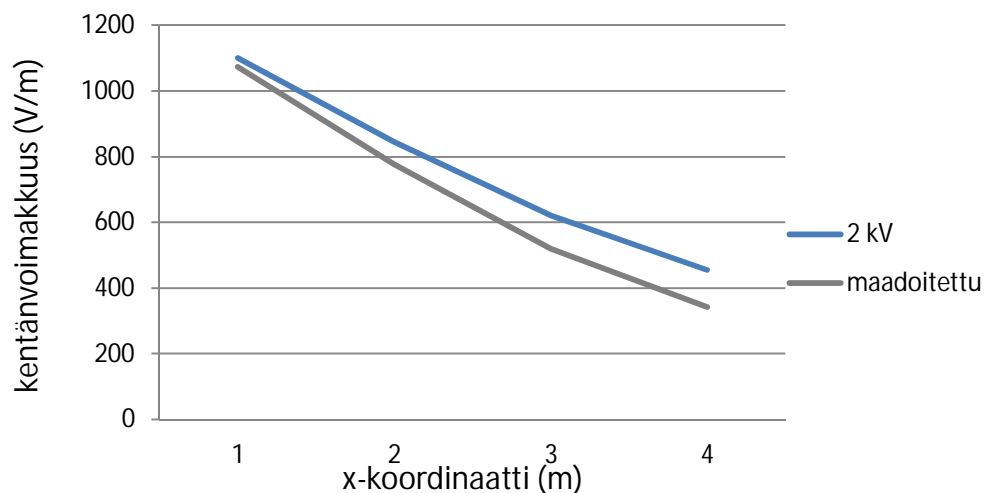
Kuvassa 22 on esitettynä samojen tilanteiden kentänvoimakkuudet neljän metrin korkeudesta, eli hyvin läheltä vähimmäistyöskentelyetäisyyttä.



Kuva 22 25 kV järjestelmän sähkökentänvoimakkuus kahden rinnakkaisen radan tapauksessa neljän metrin korkeudelta. Eri tilanteet kuvaavat oikeanpuoleisen ajojohtimen eri jännitteitä. Ajojohtimet sijaitsevat x-koordinaateissa -2,5 ja 2,5.

Kuvasta 22 huomataan, kuinka kentänvoimakkuudet ovat myös tällä etäisyydellä hyvin samansuuruiset eri tilanteiden välillä, lukuun ottamatta 25 kV tilannetta.

Tilanteista toisiaan lähimpänä ovat ymmärrettävästi maadoitettu ja 2 kV tilanne. Tarkastellaan niiden kuvaajia tarkemmin kuvassa 23.

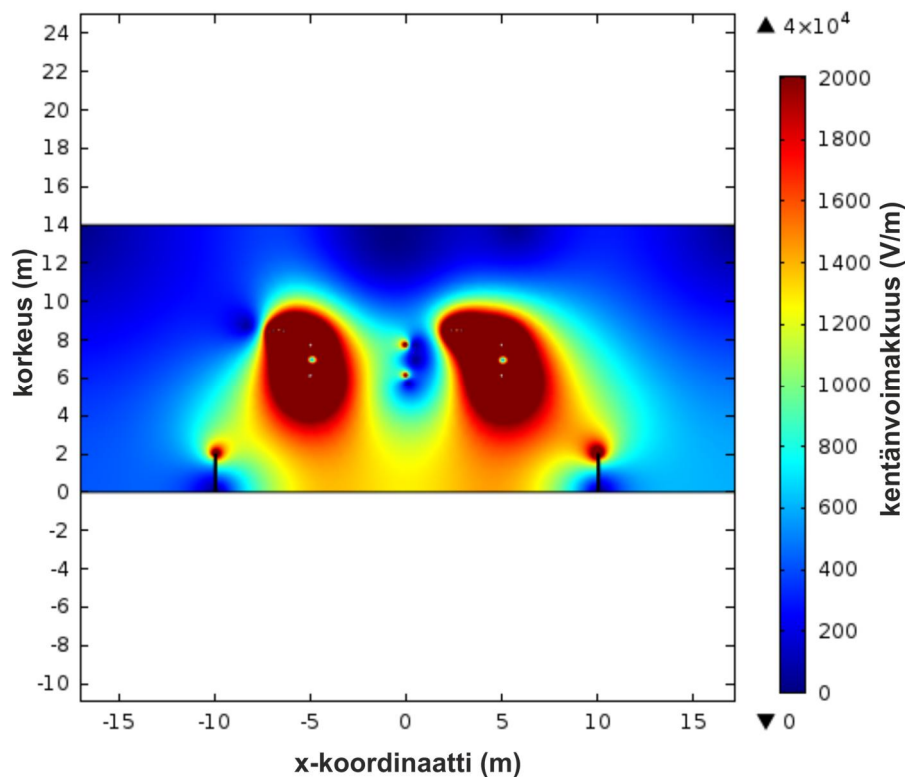


Kuva 23 25 kV järjestelmän sähkökentänvoimakkuus kahden rinnakkaisen radan tapauksessa kahden metrin korkeudella. Eri tilanteet kuvaavat oikeanpuoleisen ajojohtimen eri jännitteitä. Ajojohtin sijaitsee x-koordinaatissa 2,5.

Kuvassa 23 on esitettyä kuvaajat kentänvoimakkuuksista maadoitetun johtimen ja 2 kV tilanteissa. Kuvaajat esittävät x-koordinaatissa 2,5 m sijaitsevan ajojohtimen lähi- aluetta. Mallinnusten mukaan kentänvoimakkuudet johtimen alapuolella neljän metrin korkeudella ovat 728 V/m 2 kV tapauksessa ja 641 V/m maadoitetun johtimen tapauksessa. Ero on vain 87 V/m. Ajateltaessa maadoitetun johtimen tilannetta voidaan todeta, että JET-laitteella on luultavasti hyvin vaikea täysin varmistua sen täydestä jännitteettömyydestä ja siten työmaadoitusten olemassaolosta työkohteessa.

Aidat radan lähellä

Mallintamalla tutkittiin myös radan läheisyydessä olevien maadoitettujen aitojen vaikutusta sähkökentän jakaumaan. Kuvassa 24 on esimerkki tästä.



Kuva 24 25 kV järjestelmän sähkökentänvoimakkuus kolmen rinnakkaisen radan tapauksessa, jossa keskimmaisessa ajojohtimessa on 5 kV jännite ja radan molemmiin puolin on sijoitettu metalliaidat.

Kuvassa 24 on kuvattu aidat radan molemmiin puolin tapauksessa, jossa keskimmainen kolmesta radasta on irrotettu jännitesyötöstä. Siinä vaikuttaa kuitenkin 5 kV indusoitu jännite. Tätä tilannetta voidaan verrata kuvassa 13 esitettyyn tilanteeseen, joka on samanlainen tilanne ilman aitoja. Kuvien perusteella voidaan sanoa, että aidan vaikutus ei ole kovin merkittävä. Se muuttaa kenttää jonkin verran, mutta ei niin että se aiheuttaisi ongelmia JET-laitteen käytölle. Aidan päälle muodostuu suuren kentänvoimakkuuden alue ja aidan takana taas kentänvoimakkuus on hieman pienempi kuin tilanteessa ilman aita. Aidat ovat kuitenkin sen verran kaukana radasta, ettei tämä vaikuta käytännön

mittauksissa merkittävästi. Lisäksi JET-laitetta tulisi sen käyttöohjeen mukaan aina käyttää vähintään 0,5 metrin päässä maadoitetuista kohteista.

Yhteenveto mallinnuksista

Comsol-mallinnuksilla saatiin selvyttä sähkökentän käyttäytymisestä rataympäristössä. Tulosten perusteella voitiin suunnitella laboratoriossa ja käytännössä radalla tehtäviä mittauksia. Sähkökentän jakautuminen ratajohdon ympäristössä ei ole niin yksinkertainen asia kuin voisi kuvitella. Kentänvoimakkuuteen tietyssä pisteessä vaikuttavat monet ratajohdon komponentit ja kentänvoimakkuus voikin olla yhtä suuri eri etäisyyksillä jännitteisestä johtimesta. Etäisyyden arviointi onkin sähkökentän deformaation vuoksi epätarkkaa ja vain karkeasti suuntaa antavaa.

Erityisesti ongelmakohtia löydettiin useamman rinnakkaisen radan tapauksista. Kun lähistöllä on voimakkaan kentän aiheuttavia jännitteisiä ajojohtimia, on vaikeaa erottaa onko jännitesyötöstä irrotettu johdin maadoitettu vai vaikuttaako siinä indusoitunut jännite. Tilanteiden välillä ei kentänvoimakkuuksissa ole kuin pientä eroa, jopa johtimen lähellä. Sen selvittäminen onko johtimessa normaali käyttöjännite vai jokin muu tilanne on sen sijaan melko selväpiirteistä. Näissä tilanteissa kentänvoimakkuuksissa on huomattava ero.

Käytännön mittauksissa voidaan tutkia tilanteita, joita ei tässä mallinnettu. Näitä ovat esimerkiksi nostokorista mittaaminen ja mittaajan kehon vaikutus mittaustulokseen. Näiden tilanteiden mallintaminen olisi ollut varsin suuritöistä, eikä siten tarkoituksenmukaista. Jos ajatellaan nostokoria jännitteisen ajojohtimen lähellä ja sen vaikutusta sähkökentän jakautumiseen, niin maadoitettu nostokori tuo maatason lähemmäksi jännitteistä johdinta ja siten vahvistaa niiden välissä esiintyvää sähkökenttää. Nostokorista mitattaessa on toisaalta huomioitava nostokorin sisällä vallitseva hyvin heikko kentänvoimakkuus. Vastaavalla tavalla myös maasta mitattaessa mittaajan keho on johtava rakenne ja vaikutus sähkökenttään siten samalla tavalla vahvistava, joskaan ei niin merkittävästi. Hyvin lähellä kehoa sähkökentänvoimakkuus on kuitenkin heikompi kuin vähän kauempana kehosta.

3.2.2 Laboratoriomittaukset

JET-laitetta tutkittiin TTY:n Suurjännitelaboratoriossa suoritetuilla testeillä 28.8.2014. Testeissä pyrittiin selvittämään JET:n toimintaa jännitteisen johtimen läheisyydessä ja saamaan selville kentänvoimakkuusarvojen ja JET:n antaman tuloksen yhteyttä.

Testiä varten oli laboratorion poikki viritetty johdin noin 6 metrin korkeuteen. Johtimen jännitettä vaihdeltiin testissä välillä 2 - 30 kV. Mittausympäristö vaikutti jonkin verran saatuihin tuloksiin, koska laboratorion seinät ja erilaiset rakenteet vaikuttavat kentän muotoutumiseen. Tämä täytyy ottaa huomioon tuloksia tulkittaessa ja vertailla radalla tehtyjen testien tuloksiin. Kuvassa 25 on esitetty käytetyt mittausjärjestelyt.



Kuva 25 Mittausjärjestelyt Suurjännitelaboratoriossa

Mittaukset suoritettiin pääasiassa pitämällä JET-laitetta kädessä, jolloin mittaustilanne vastasi radalla suoritettavaa mittausta. Tällöin mittaajan keho vaikuttaa sähkökentän deformaatioon ja JET-laitteen tulos on erilainen kuin täysin vapaassa kentässä. Myös vapaan kentän mittauksia tehtiin JET-laitteen hälytysrajoja määritettäessä. Sähkökentänvoimakkuuksia mitattiin myös sähkökenttämittarilla (Holaday HI-3604).

Taulukoissa 3-6 esitellään tulokset, jotka on saatu mitattaessa JET-laitteella eri etäisyyksiltä johtimesta, jonka jännitettä on vaihdeltu.

Taulukko 3: JET-laitteen mittaustulos, kun johtimen jännite on 25 kV. Taulukossa on esitetty laitteessa syttyvien ledien lukumäärä, sekä toimiko laitteen hälytys (h).

	2 m johdon keskilinjasta		4 m johdon keskilinjasta		johdon alla	
korkeus / JET-asento	JET ETÄ	JET LÄHI	JET ETÄ	JET-LÄHI	JET ETÄ	JET LÄHI
1 m	0/1	0	0	0	0/1	0
1,5 m	2/3 h	0	1	0	2/3 h	0
2 m	3 h	0	1	0	5 h	1
3,5 m	6-8 h	2	3 h	0	8 h	4-5 h

Taulukko 4: JET-laitteen mittaustulos, kun johtimen jännite on 19,5 kV. Taulukossa on esitetty laitteessa syttyvien ledien lukumäärä, sekä toimiko laitteen hälytys (h).

	2 m johdon keskilinjasta		4 m johdon keskilinjasta		johdon alla	
korkeus / JET-asento	JET ETÄ	JET LÄHI	JET ETÄ	JET LÄHI	JET ETÄ	JET LÄHI
1 m						
1,5 m	1	0	0	0	2 h	0
2 m	2-3 h	0	1	0	4 h	0
3,5 m						

Taulukko 5: JET-laitteen mittaustulos, kun johtimen jännite on 5 kV. Taulukossa on esitetty laitteessa syttyvien ledien lukumäärä, sekä toimiko laitteen hälytys (h).

	2 m johdon keskilinjasta		4 m johdon keskilinjasta		johdon alla	
korkeus / JET-asento	JET ETÄ	JET LÄHI	JET ETÄ	JET LÄHI	JET ETÄ	JET LÄHI
1 m						
1,5 m	0	0	0	0	1	0
2 m	0	0	0	0	1	0
3,5 m	2-3 h	0	0-1	0	4 h	0

Taulukko 6: JET-laitteen mittaustulos, kun johtimen jännite on 2 kV. Taulukossa on esitetty laitteessa syttyvien ledien lukumäärä, sekä toimiko laitteen hälytys (h).

	2 m johdon keskilinjasta		4 m johdon keskilinjasta		johdon alla	
korkeus / JET-asento	JET ETÄ	JET LÄHI	JET ETÄ	JET LÄHI	JET ETÄ	JET LÄHI
1 m						
1,5 m	0	0	0	0	0	0
2 m	0	0	0	0	0	0
3,5 m	1	0	0	0	1-2	0

Taulukossa 3 on esitetty tulokset kun johtimessa on sähköradan normaalia käyttöjännitettä vastaava 25 kV jännite. 25 kV johtimen tapauksesta saadut tulokset vastasivat odotuksia melko hyvin. Taulukossa 4 on esitetty tulokset kun johtimen jännite on 19,5 kV, mikä vastaa radalla normaalissa käytössä esiintyvää pienintä jännitettä. 19,5 kV jännitteellä mitattiin vain kahdelta korkeudelta ja saadut tulokset vastasivat oletuksia.

Taulukossa 5 taas on esitelty tulokset, kun johtimen jännite on 5 kV, mikä vastaa tyhjäkäyvään johtimeen indusoitunutta melko suurta jännitettä. 5 kV jännitteellä JET-

laitteella saadaan mittaustulos ETÄ-asennolla, kun ollaan noin 4-5 m päässä johtimesta. Hälytys saadaan kun ETÄ-asennolla mitattaessa ollaan noin 3 m päässä johtimesta. Taulukossa 6 on esiteltynä tulokset kun johtimen jännite on 2 kV, mikä vastaa johtimeen indusoitunutta pienehköä jännitettä. Näin pienellä jännitteellä vain ETÄ-asennolla saadaan JET-laite ilmaisemaan jännitteisen kohteen läheisyys. Tämä tulos saadaan noin 3 m etäisyydeltä.

Lisäanturi

Mittauksissa testattiin myös JET-laitteen lisäanturin prototyypiversiota. Lisäanturi oli kiinnitettynä kypärän otsaosaan ja yhdistetty rintataskussa olleen JET-laitteen latauspistokkeeseen. Kuvassa 26 on lisäanturin kiinnitys kypärään. Taulukossa 7 on esitettynä lisäanturilla saadut tulokset, kun johtimen jännite on 25 kV.



Kuva 26 Lisäanturin prototyypiversion kiinnitys kypärään testausta varten.

Taulukko 7: JET-laitteen mittaustulos lisäanturin kanssa, kun johtimen jännite on 25 kV. Taulukossa on esitetty laitteessa syttyvien ledien lukumäärä, sekä toimiko laitteen hälytys (h).

lisäanturin sijainti	2 m johdon keski-linjasta		4 m johdon keski-linjasta		johdon alla	
korkeus / JET-asento	lisään. ETÄ	lisään. LÄHI	lisään. ETÄ	lisään. LÄHI	lisään. ETÄ	lisään. LÄHI
1,8 m	2 h	0	0	0	2-3 h	0

Kuten kuvasta 26 havaitaan, anturin kiinnityspaikaksi kypärään valittiin otsa. Näin anturi on automaattisesti suunnattuna eteen- ja ylöspäin, jossa jännitteinen johdinkin on. Mitattaessa anturin kanssa havaittiin, että mittaustulos riippuu kuitenkin huomattavasti

pään ja sitä kautta sensorin asennosta. Lisäanturilla saadut tulokset olivat hieman pienempiä kuin JET-laitteella, mikä selittyy luultavasti lisäanturin sijainnilla kehon lähellä. Ero ei kuitenkaan ollut merkittävä. Lisäanturin toiminnassa tuntui esiintyvän vaihtelua, mutta tämä johtui ilmeisesti prototyypin liittimessä olevasta kontaktiongelmasta. Lisäanturi toimi melko hyvin.

Hälytysrajat

Testeissä etsittiin myös sähkökentänvoimakkuuden arvoja JET-laitteen ETÄ-asennon hälytysrajalle ja eri ledien syttymiselle. Näitä mitattiin siten, että pitäen JET-laitetta kädessä etsittiin johdon jännitetasoja, joissa ledit syttyvät. Samoista kohdista mitattiin sitten samoilla jännitetasoilla sähkökentänvoimakkuusarvot, mittaria kädessä pitäen. Koska sekä JET-laitetta, että sähkökenttämittaria pidettiin kädessä mitattaessa, mittajaan keho vaikutti saatuihin tuloksiin.

ETÄ-asennon hälytysrajaa ja ledien syttymisrajoja tutkittiin myös järjestelyllä, jossa JET-laite asennettiin eristävään telineeseen mittauksen ajaksi, jolloin mittajaan keho ei vaikuttanut sähkökenttään. Samasta paikasta mitattiin sekä kentänvoimakkuusarvo että JET-laitteen antama tulos. Käytännössä sopiva kentänvoimakkuus haettiin nostamalla jännitettä linjassa ja tarkkailemalla milloin JET-laitteen ledit syttyivät. Kuvassa 27 on mittausjärjestelyt esitettynä. Taulukossa 8 on esitettynä molemmilla mittausjärjestelyillä saadut tulokset.



Kuva 27 Mittausjärjestelyt JET-laitteen hälytysrajojen mittaamiseen vapaassa kentässä.

Taulukko 8: JET-laitteen hälytyksen ja ledien syttymisrajoja mitattuna sekä laitetta kädessä pitäen, että vapaassa kentässä.

syttyneet ledit (kpl)	laite kädessä (V/m)	vapaa kenttä (V/m)
1	225	610
2	515 h	1290 h
3	630	1960

Kuten taulukosta 8 havaitaan, kovin korkealle mittauksessa ei päästy, vain ETÄ-asennon kolmannen ledin kohdalle. Kuvassa 25 näkyvä mittausjärjestely oli sen verran etäällä jännitteisestä linjasta, että käytettävissä ollut kentänvoimakkuus jäi turhan pieneksi. Linjan jännitettä ei voitu sen asennustavan vuoksi nostaa kuin noin 60 kV tasolle. Koska JET-laitetta ei käytetä vapaassa kentässä, mitatut arvot eivät kuvaa todellista mitaustilannetta, mutta ne antavat yhdessä edellisten tulosten kanssa hyvän kuvan mittajan kehon vaikutuksesta kentänvoimakkuuteen.

Yleisiä havaintoja

Otteella on huomattava vaikutus laitteen antamaan tulokseen. Jos laitteesta pidetään kiinni laitteen yläosasta siten, että sensori peittyy, niin laitteen antama tulos ei ole luotettava. Laitteen keskiosasta kiinni pidettäessä tulos vääristyy jonkin verran. Oikeanlaisessa otteessa, jossa pidetään kiinni vain laitteen alaosasta, saadaan tulos joka on luotettava.

Mitattaessa laite tulee suunnata tarkasteltavaan kohteeseen, muutoin tulos heikkenee merkittävästi. Taskusta ja takin alta laite ei toimi. Kehon läheisyys ja takkikin vaimentavat kenttää, jolloin kentän mittaus ei onnistu.

3.2.3 Mittaukset radalla

JET-laitetta testattiin myös käytännössä sähköradoilla. Kohteet joissa JET-laitetta testattiin, olivat ratapihoilla, kytkinasemalla ja veturihallissa. Radalla tehdyissä mittauksissa ei haettu tarkkoja arvoja tai analyttisiä tuloksia, vaan tyydyttiin lähinnä tutkimaan laitteen käyttöä ja käytettävyyttä todellisessa työympäristössään.

Ratapihalla JET-laitetta testattiin Helsingissä, Tampereella ja Kouvolassa. Ratapihoilla JET-laitteessa palavat ETÄ-asennolla usein kaikki ledit oltaessa jännitteisen ajojohtimen alla. Tämä näkyy kuvassa 28, jossa JET-laitetta testataan Kouvolan ratapihalla.



Kuva 28 JET-laitetta testataan Kouvolan ratapihalla

Kuten kuvasta 28 havaitaan, oltaessa jännitteisen johtimen alla kaikki ledit palavat ja JET-laite hälyttää. Myös jännitesyötöstä erotettujen johtimien alla osa ledeistä palaa, koska viereisten raiteiden ajojohtimien aiheuttama kenttä on niin voimakas. Tästä huolimatta normaalijännitteisten ja jännitesyötöstä erotettujen johtimien tunnistaminen toisistaan JET-laitteella oli hyvin selkeää. JET-laite myös reagoi välittömästi muutoksiin kentänvoimakkuudessa, kun johtimen jännite katkaistiin ja sitten taas palautettiin päälle. Lisäanturin prototyyppiversion kanssa testatessa JET-laite antoi samaa tasoa olevia, mutta hieman alhaisempia tuloksia kuin ilman anturia.

Veturihallissa laitetta testattiin Helsingissä ja Kouvolassa. Maadoitetut rakenteet vaikuttivat selkeästi laitteen antamaan tulokseen. Joissain kohdissa laite ei hälyttänyt hyvin lähelläkään 25 kV jännitettä. Myös Lahden lähellä sijaitsevan kytkinaseman sisäl-

lä testattaessa JET-laitteen antama tulos oli alhainen verrattuna jännitteisen kohteen läheisyyteen. Kuvassa 29 näemme tilanteen tarkemmin.



Kuva 29 JET-laitteen antama tulos kytkinasemalla

Kuten kuvasta 29 näkyy, JET-laite antaa tuloksen jännitteen läheisyydestä. LÄHI-asennolla mitattaessa laite ei kuitenkaan vielä hälytä, vaikka ollaan jo hyvin lähellä, noin metrin päässä jännitteisestä kohteesta. Tulos oli kuitenkin odotusten mukainen, koska oli tiedossa että maadoitetut rakenteet vaikuttavat sähkökenttään.

Radalla tehtyjen testien perusteella JET-laitteen voi todeta toimivan yksittäisillä raideosuuksilla ja ratapihoilla niin kuin se on suunniteltukin toimivaksi. Sillä pystyy selkeästi erottamaan normaalijännitteisen ja jännitesyötöstä erotetun johtimen toisistaan. Veturihalleissa ja kytkinasemilla laitteen antama tulos ei ole selkeä erilaisten maadoitetujen kohteiden vuoksi. Onkin varsin selvää, että näissä kohteissa JET-laitetta ei tulisi käyttää.

4 JET - JÄNNITTEEN ETÄTOTEAJA JA SEN KÄYTTÖKOKEMUKSET

JET-jännitteen etätoteaja on Eltel Oy:n ja Domax Oy:n omana kehitystyönä suunniteltu ja toteutettu laite jännitteisen kohteen tunnistamiseen etäältä. Laite on myös valmistettu Suomessa. Laitteesta on patenttihakemus, jolle on annettu 6.10.2014 hyväksyvä välipäätös. [13] Laitteesta on olemassa erilaisia versioita, jotka on tarkoitettu esimerkiksi siirto- ja jakeluverkoille. Nyt tarkastelussa on laitteen RR-versio (RailRoad) rautateille, joka on optimoitu sähköradalla käytettävälle 25 kV jännitteelle. Laitteen toiminta perustuu jännitteisen avojohdon tai rakenteen tunnistamiseen mittaamalla sähkökentän voimakkuutta kohteen läheisyydessä. Laite on tarkoitettu pidettäväksi mukana ja käytettäväksi tarvittaessa muiden turvamenettelyjen lisäksi. Laite tarjoaa perinteisiä menetelmiä helpommin liikuteltavan ja käytettävän vaihtoehdon lisävarmistuksen tekemiseen kohteen jännitteettömyydestä.

4.1 Perustoiminta

4.1.1 Fyysinen ja yleinen kuvaus

Laite on mitoiltaan 90 x 50 x 25 mm ja painaa 140 g, joten se mahtuu hyvin taskuun ja on helppo kuljettaa mukana. Laite on väriltään oranssi. Kuvassa 30 on kuvattu laite etu- ja takapuolelta sekä myös valokuva laitteesta.



Kuva 30 Jet-laite

Laitteessa on 8 lediä, jotka ilmoittavat mitatun sähkökentän voimakkuuden asteikolla heikko-vahva. Laitteessa on myös hälytysled, akun alhaisesta jännitteestä varoittava ledi ja ON/OFF ledi. Laitteen päässä on sensorialue, mikä on myös laitteeseen painettu. Samasta yhteydestä löytyy myös nuoli ja ohje, että mitattaessa laitteella tulee osoittaa johon, sekä merkintä joka kieltää peittämästä sensorialuetta.

Etätoteajan alapäässä on kaksi käyttökytkintä, pääkytkin ja mittausalueen valitsin. Mittausalueen valitsin on kaksiasentoinen pyörivä kytkin, jolla valitaan käytettävä mitaustaso (ETÄ tai LÄHI). Kytkimet on pyritty toteuttamaan niin, ettei laite kytkeytyisi vahingossa pois päältä.

Laitteen takapuolella on taulukko mittaasetäisyyksistä, millä esitetään suuntaa antavasti miltä etäisyydeltä laitetta ja sen mittausasentoja voidaan käyttää.. Kuvassa 31 on taulukko mittaasetäisyyksistä.

Rev: RR	Un = 25kV (vaihejännite) juna					
Taso ->	LÄHI			ETÄ		
	3	4	5	8	10	12+
	JET <- [m] -> jännitteellinen kohta					

Kuva 31 Taulukko mittaasetäisyyksistä eri mittausasennoilla

Laitteen päässä on micro-USB latausliitin, joka on suojattu erillisellä suojatulpalla. Suojatulpan ollessa paikallaan laitteella on tiiviysluokitus IP 42.

Valmiustilassa laitteen akku kestää n. 30 h ja jatkuvaa hälytystä n. 4 h. Latausaika on n. 10 h. Erillistä akun latauksen valmistumisesta kertovaa valoa tai indikaatiota ei laitteessa tai laturissa ole. Akun jännitteen pudotessa alle raja-arvon laite varoittaa ledillä alhaisesta varauksesta. Tämän jälkeenkin laite kuitenkin toimii yhä luotettavasti, niin kauan kuin akussa on varausta. Käyttölämpötilaksi laitteelle on annettu $-15 - + 30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Laitteeseen on myös saatavilla erillinen lisäanturi, joka liitetään latausliittimeen. Lisäanturista on tarkasteltavana proto-versio, joka on käytännössä erillinen sensoriyksikkö noin 30 cm pituisen johdon päässä. Lisäanturin avulla JET-laitetta voi pitää taskussa jolloin lisäanturi mittaa sähkökenttää esimerkiksi kypärään kiinnitettynä.

4.1.2 Mittaaminen

Laitetta käytetään suuntaamalla se kohteeseen, jonka jännitteettömyydestä ollaan kiinnostuneita ja laite ilmoittaa havaitsemansa sähkökentänvoimakkuuden. Kentänvoimakkuus ilmaistaan 8 ledillä, jotka syttyvät asteittain kentänvoimakkuuden mukaan. Laitteessa on ledien vieressä mitta-asteikko heikko-vahva. Kentänvoimakkuuden ylittäessä asetetun raja-arvon, laite hälyttää myös äänellä ja värinällä. Raja arvot ovat herkkyyksillä ETÄ noin kahden LED valon kohdalla ja LÄHI noin neljän LED valon kohdalla. Käytännössä sähköradalla nämä etäisyydet normaalijännitteisestä ajojohtimesta ovat noin 2 m LÄHI asennolla ja 5 m ETÄ asennolla, kun mittauspisteen lähellä ei ole sähkökenttää häiritseviä rakenteita.

Jotta saatu tulos olisi luotettava, on tärkeää pitää mitattaessa laitetta kädessä oikealla otteella. Tätä havainnollistaa kuva 32.



Kuva 32 Oikea ote JET-laitteesta

Kuten kuvassa 32 on esitetty, oikeanlaisessa otteessa laitteen sensorialue ei peity, jolloin mittajaan käsi ei vaimenna sähkökenttää ja siten vääristä mittaustulosta. Mittaaja vääristää joka tapauksessa sähkökenttää, mutta pidettäessä laitetta oikeassa otteessa vääristymä on oletetun kaltainen. Taskussa pidettäessä laite ei toimi luotettavasti, koska keho vaimentaa ja muokkaa sähkökenttää anturin alueella. Laitetta ei tosin tämän tyylliseen käyttöön ole suunniteltukaan.

Toimiminen mukana kulkevana hälyttävänä varoituslaitteena edellyttäisi ulkoisen anturin käyttöä tai koko laitteen kiinnitystä esimerkiksi kypärään. Lisäksi anturi tulee olla oikein suunnattu ja ainakin hieman irti kehosta, jotta toiminta olisi luotettavaa. Laitteessa on optio ulkoiselle sensorille ja siitä on tätä työtä tehdessä tarkasteltavana prototyyppiversio. Haasteena lisäanturin käytössä on myös hälytyksen havaitseminen esimerkiksi laitteen ollessa taskussa.

Laite mittaa sähkökenttää koko ajan, kun kytkin on ON asennossa. Varsinaisesti mittään erillistä nappia ei siis tarvitse painaa. Laite tulee kuitenkin suunnata kohteeseen luotettavan tuloksen saamiseksi. Mittausetäisyys on 2 - 12 m, eli pienintä työskentelyetäisyyttä jännitteellisistä osista ei saa mitattaessa alittaa. Suuntaamalla laitetta eri suuntiin saadaan erisuuruisia tuloksia ja näin voidaan päätellä mistä suunnasta kenttä on lähtöisin, eli mikä johto on jännitteellinen.

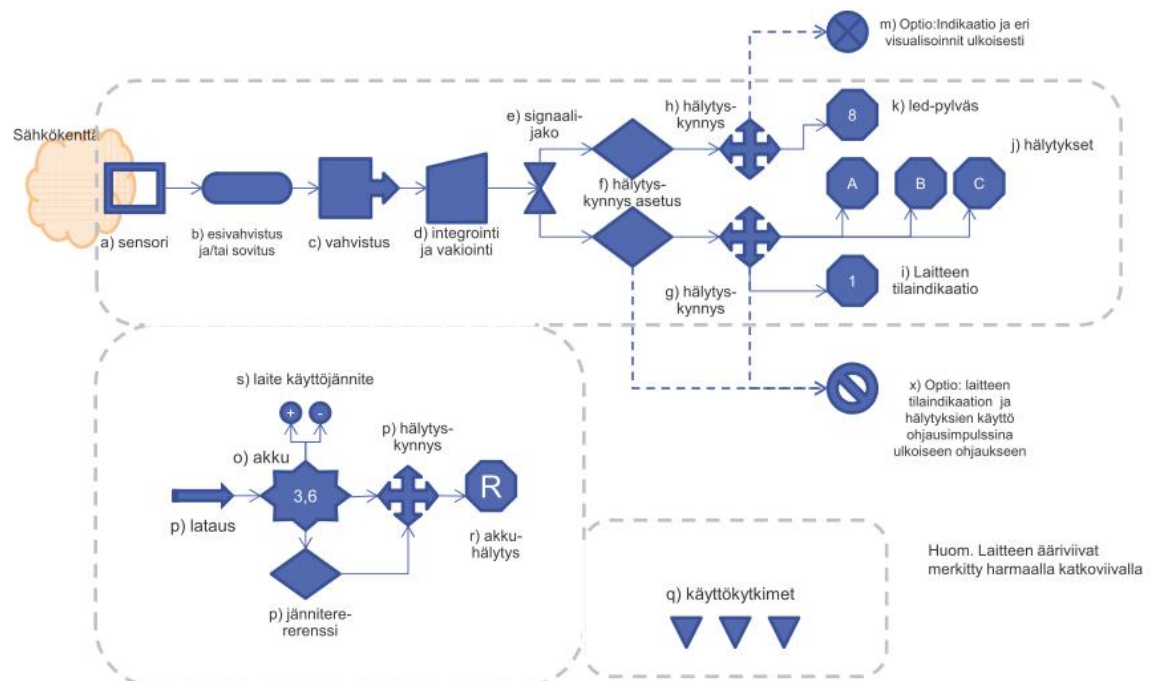
Mittaaminen tulisi aina aloittaa herkemällä asetuksella (ETÄ) jolloin saadaan tietoa jännitteisistä kohteista riittävän kaukaa. Kun jännitteisen kohteen läheisyys on havaittu, voidaan LÄHI-asetuksella saada lisätietoa siitä siirtämällä JET-laitetta mittaamaan eri etäisyyksiltä ja suunnista. Näin voidaan päätellä tarkemmin, mikä kohde on jännitteellinen, mikä jännitteetön ja missä on mahdollisesti latausjännite.

Mitattaessa useamman radan ollessa rinnan annetaan ohjeeksi ensin kävellä kaikkien ajojohtimien alitse ja tulosten mukaan muodostaa käsitys jännitteisistä kohteista. Tämän jälkeen kohteita voi tutkia tarkemmin ja päätellä näin johtimien tilanne, (jännitteellinen, jännitteetön tai latausjännite).

Laitteessa on myös sisäänrakennettu testaustoiminto, jolla voidaan tarkistaa mitasensorin toiminta 230 V normaalilla vaihejännitteellä. Käyttäjät voisivat esimerkiksi testata laitteen aamulla töihin lähtiessä tai kahvitauolla käydessä. Testaus tapahtuu viemällä laitteen sensorialue noin 1 cm päähän 230 VAC johdosta, jolloin led syttyy ja sekä summeri että värinähälytys käynnistyvät. Laite olisi ohjeen mukaan hyvä testata säännöllisesti vähintään kuukausittain. [14]

4.2 Toimintaperiaate

Kuten edellä on todettu, laite mittaa sähkökentän voimakkuutta, ilmaisee mitatun kentänvoimakkuuden suhteellisarvona ja hälyttää ennalta asetetun raja-arvon ylittävistä sähkökentästä. Laitteen toimintaa havainnollistaa kuvassa 33 esitetty vuokaavio laitteen toimintaperiaatteesta.



Kuva 33 Vuokaavio JET-laitteen toimintaperiaatteesta

Laitteen sensorina on yksiakselinen dipolityyppinen sähkökenttäanturi, jota on käsitelty kohdassa 3.1.2. Sensori on rakenteeltaan yksinkertainen ja toimintavarma. Sensorilta saatava signaali ensin vahvistetaan ja integroidaan, jonka jälkeen se jaetaan kahtia hälytysjärjestelmää varten. Sensorilta saatavan signaalin käsittelyyn ei tässä työssä tämän tarkemmin perehdytä. Hälytysjärjestelmä on kahdennettu siten, että summeri ja värinä muodostavat oman järjestelmänsä ja ledit omansa. Näin varmistetaan hälytyksen toimivuutta. Laite myös tarkkailee akun napajännitettä, vertaa sitä jännitereferenssiin ja hälyttää jännitteen laskiessa. Lisäksi laitteessa on myös optio ulkoiselle anturille ja hälytyssignaalin käytölle jonkun muun laitteen ohjaussignaalina.

4.3 Käyttö rataympäristössä

Rataympäristössä mittaamiseen aiheutuu haastetta useista suhteellisen lähekkäisistä ajojohtimista, kelluviin rakenteisiin indusoituneista jännitteistä ja maadoitetuista rakenteista. Laitetta ohjeistetaan käyttämään vähintään 0,5 m etäisyydellä maadoitetuista kohteista, jotta saataisiin luotettava mittaustulos. Maadoitusten sähkökenttään aiheuttamia kentänvarjostuksia on käsitelty aiemmin kohdassa 3.1.1. Ongelmallisia kohteita ovat esimerkiksi muuntajakopit, joissa sähkökenttä on pääsääntöisesti heikko.

Maakaapeli jännitteisyyttä laitteella ei voida mitata, koska maakaapeli ei luo ulkopuolelleen sähkökenttää konsentrisen maadoitusjohtimen vuoksi. Laite mittaa vain vaihtojännitteen aiheuttamaa kenttää, eli tasasähkökenttää laite ei havaitse. Rataympäristössä nämä rajoitukset eivät käytännössä vaikuta mittaustoimintaan, mutta ne on hyvä kuitenkin käyttäjien tiedostaa.

4.4 Toimintavarmuus

Laite vaikuttaa varsin toimintavarmalta, mutta siinä on kuitenkin myös joitain puutteita. Se kestää pienet kolhut ja pudotukset, mutta toimivuus on luonnollisesti syytä tarkastaa pudotuksen jälkeen. Laitteen anturin rakenne on yksinkertainen ja samalla myös kestävä ja varma. Laitteen mittaustarkkuus riittää hyvin. Aalto-yliopistolla aikaisemmin tehtyjen testien perusteella laitteen mittaustarkkuuden voidaan sanoa olevan hyvä ja jopa parempi kuin tarvittaisiin tässä sovelluksessa.

Laitteelle on annettu kotelointiluokka IP 42 USB-liittimen suojatulpan ollessa paikallaan. Tämä tarkoittaa, että laite kestää pienen kosteuden ja roiskeveden, mutta laitetta ei tulisi käyttää kovassa sateessa ilman suojatulppaa. Käytännössä suojatulppa luultavasti kuitenkin hukkuu melko nopeasti. Käyttö sateessa ilman suojatulppaa aiheuttaa riskin laitteen rikkoutumisesta. Radalla tehtävät työt on kuitenkin tehtävä säästä riippumatta ja myös turvalaitteiden tulisi toimia kaikissa olosuhteissa. Tämä on selkeästi puute laitteen toimintavarmuudessa, mutta se voitaneen ratkaista toisenlaisen suojatulpan tai liittimen avulla.

Käyttölämpötiloiksi laitteelle on annettu $-15 - + 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kumpikaan rajoista ei ole riittävä. Yläraja $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ voi kuumina kesäpäivinä ylittyä. Alaraja $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ on liian korkea, koska jopa $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja alle ovat hyvin mahdollisia lämpötiloja ja alle $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ jopa tavanomainen lämpötila Suomen talvessa. Luultavasti laite kuitenkin käytännössä toimii myös rajojen ulkopuolellakin. Valmistajan tulisi pystyä lupaamaan laitteelle laajemmat toimintarajat.

Akkuna laitteessa on käytetty perinteistä Ni-Cd akkua. Tätä akkutyyppeä on päädytty käyttämään teknisen toteutuksen vuoksi, jotta akun jännitettä pystytään seuraamaan helpommin. Akuista voidaan sanoa yleisesti, että niiden ominaisuudet heikkenevät ikääntymisen myötä. Myös kylmällä akun kesto heikkenee. Akku on sijoitettu kiinteästi laitteen sisään, eikä sitä ole tarkoitettu itse vaihdettavaksi. Akun vaihtamiseksi olisi laite purettava, mikä on vastoin takuuehtoja.

4.5 Käyttökokemukset

Tässä työssä tutkittavia JET-laitteita on hankittu viisi kappaletta, joista yksi on käytössä työn kirjoittajalla ja loput neljä testikäytössä sähköradan kunnossapitäjillä. Laitteista saatuja käyttökokemuksia on kerätty sähköpostikyselyillä, puhelinhaastatteluilla ja henkilökohtaisilla haastatteluilla. Henkilökohtaisilla haastatteluilla on saatu parhaiten kerättyä käyttökokemuksia, odotuksia laitteesta ja kehitysehdotuksia.

Koekäyttäjät ovat käyttäneet JET-laitetta yleisesti ottaen melko vähän työssään. JET-laitteen testikäytössä olevan version puutteena on pidetty sitä, että se ei toimi hälytyslaitteena vaan vaatii mittaustoimenpiteen. Tämä kertoo jonkin verran siitä millaisia odotuksia tai toiveita laitteesta oli käyttäjillä. Mentäessä radalle töihin käytetään ohjeiden mukaisia perinteisiä menetelmiä jännitteettömyyden todentamiseen ennen maadoituksen tekoa. Tämän takia JET-laite on jäänyt vähälle käytölle. Laitteelle kaivattaisiinkin virallista hyväksyntää jännitteentoteajana, jolloin sillä voisi korvata nykyään käytössä olevan jännitteenkoettimen. Lisäturvalaitetta, jolla varmuuden vuoksi tutkittaisiin jännitetilannetta, ei pidetä tarpeellisena. Tämä johtuu suurelta osin siitä, että nykyisilläänkin menettelyillä käyttäjät kokevat olevansa hyvin varmoja kohteen jännitteettömyydestä töihin mennessään. Ennen töihin ryhtymistä käytännössä vielä varmistetaan, että maadoitukset näkyvät tai jännitteettömyys todetaan paikan päällä. JET-laitteen käyttöä ei näin ollen pidetä tarpeellisena ja se koetaan turhaksi, ylimääräiseksi tehtäväksi. Käyttäjät pitävät melko suurena puutteena myös sitä, että laitteen antama tulos ei ole selkeä kaikissa työympäristöissä, kuten kytkinasemien sisällä ja veturihallissa.

Lisäanturista käyttäjillä on hieman positiivisempi mielipide, mutta johdollista anturia pidetään kuitenkin käytännössä hankalana ja alttiina rikkoutumiselle. Lisäksi lisäanturin antaman tiedon hyödyllisyyttä pidetään kyseenalaisena, koska usein työskennellessään tietoisesti hyvin lähellä jännitteisiä linjoja, jolloin laitteen jatkuva hälyttäminen koettaisiin häiritseväksi.

Yhteenvetona voidaan todeta, että käyttäjät eivät pidä laitetta tarpeellisena omassa työssään, eivätkä uskalla luottaa siihen, koska se ei toimi kaikissa ympäristöissä. Laitteen antama tieto on lisäksi usein muutenkin tiedossa. Laitetta ei näin ollen tulisi heidän mukaansa todennäköisesti käytettyä. Omat kokemukset laitteesta ovat koekäyttäjien kanssa samansuuntaisia. Laite on sinänsä toimiva, mutta käytännön tarve sille tuntuu puuttuvan. Lisäksi testikäytössä olleessa versiossa olevat puutteet heikentävät sen käytettävyyttä.

4.6 Kehittämiskohteita

Kerättyjen käyttökokemusten ja omien tutkimusten pohjalta laitteesta on löytynyt muutamia kehittämiskohteita. Laitteessa saisi olla rannelenkki, jonka avulla voitaisiin välttää laitteen turhia putoamisia. Korkealla ja kiireessä työskenneltäessä laite voi helposti lipsahtaa käsistä. Vaikka laitteen pitäisikin kestää pieni pudotus, korkealta nostokorista

putoamista se ei välttämättä kestä. Laitteen väri voisi rautatieympäristössä olla mieluummin keltainen, koska keltaista väriä käytetään siellä muutoinkin suojavärinä.

Laitetta täytyisi voida käyttää kaikissa olosuhteissa. Tämä edellyttäisi vesitiiviyttä, jolloin laitetta voitaisiin käyttää myös kovalla sateella. Toinen käyttöolosuhteisiin liittyvä kehittämiskohde on käyttölämpötila alue, jota pitäisi saada kasvatettua sekä ylä- että alapäässä.

Laitteessa on alhaisesta varauksesta kertova ledi, joka osoittaa akun lataustarpeen. Akkua ladatessa ei kuitenkaan ole minkäänlaista osoitinta laitteessa eikä laturissa, joka osoittaisi akun latautuneen täyteen. Sellainen olisi hyödyllinen, vaikkei tietenkään välttämätön.

Laitteeseen on olemassa ulkopuolinen anturi, josta on ollut tutkittavana prototyyppi-versio. Lisäanturi laajentaisi JET:n käyttötarkoitusta myös hälytyslaitteeksi. Johdolla JET:ssa kiinni oleva lisäanturi voitaisiin sijoittaa esimerkiksi kypärään. Tarvittavasta johdosta aiheutuu kuitenkin ongelmia, koska se on tiellä ja voi mahdollisesti tarttua johonkin. Toinen ongelma lisäanturin kanssa on hälytyksen havaitseminen taskusta meluisassa ympäristössä. Hälytyslaitteena toimimiseksi voisikin olla parempi keskittyä lisäanturin sijaan koko JET-laitteen kiinnittämiseen kypärään. Suhteellisen pienen kokonsa ja painonsa ansiosta tämä voisi olla mahdollista.

Jossain tilanteissa voisi olla hyötyä myös mahdollisuudesta säätää hälytysäänen tasoa. Esimerkiksi hyvin meluisassa ympäristössä hälytyksen äänenvoimakkuutta voisi säätää suuremmaksi, mutta käytännössä täytyisi kuitenkin varmistaa että hälytystaso on säädöstä huolimatta aina riittävä kaikissa tilanteissa.

5 RISKIANALYYSI

Rataympäristössä esiintyy hengenvaarallisia suurjännitteitä. Nyt tutkittavana oleva JET-laitte on tarkoitettu käytettäväksi tässä ympäristössä lisäturvalaitteena. JET-laitteella on tarkoitus pienentää työntekijöille suurjännitteistä aiheutuvaa vaaraa helpottamalla jännitteisten kohteiden havainnointia. Tässä riskianalyysissä etsitään ja analysoidaan JET-laitteen käyttöön liittyviä vaaroja ja arvioidaan riskien suuruutta. Samalla arvioidaan myös riskejä, joita sen käytön avulla voisi mahdollisesti pienentää.

5.1 Riskien arviointi

Riskien arvioinnissa tunnistetaan olemassa olevia vaaroja ja määritetään riskin suuruuden ja seurausten vakavuutta. Tähän on alan kirjallisuudessa olemassa useita eri menetelmiä. Tässä työssä käytetään soveltuvia osia kustakin menetelmästä, jotta saadaan laadittua mahdollisimman tarkoituksenmukainen ja täydellinen riskianalyysi laitteesta ja sen käytöstä. Sovellettuja menetelmiä ovat POA (Potentiaalisten Ongelmien Analyysi), TTA (Työn TurvallisuusAnalyysi), TVA (ToimintoVirheAnalyysi).

Seuraavassa on esitetty lyhyet kuvaukset sovelletuista menetelmistä.

Potentiaalisten Ongelmien Analyysi

Menetelmän tavoitteena on löytää keskeisimmät ongelma-alueet ja keskeisimpiin vaaroihin liittyvät onnettomuustekijät. Kohteen onnettomuusvaarat etsitään ja luokitellaan, jonka jälkeen niiden syitä ja seurauksia analysoidaan. [15]

Työn TurvallisuusAnalyysi

Menetelmän tavoitteena on löytää työtehtävään tai tekniseen järjestelmään liittyvät tapaturmavaarat. Niitä etsitään jakamalla työtehtävä toimintoihin, jolloin vaarojen syitä ja seurauksia on helpompi tarkastella systemaattisesti. [15]

ToimintoVirheAnalyysi

Menetelmän tavoite on löytää ihmisen toimintovirheistä aiheutuvat vaarat. Niitä etsitään jakamalla rajattu työtehtävä toimintoihin ja tunnistamalla niissä esiintyviä virhemahdollisuuksia ja niiden seurauksia. [15]

Näissä menetelmissä vaaroja etsitään yleisesti tarkastelemalla työtehtäviä yksityiskohdaisesti työryhmässä, usein aivoriihen avulla. Tässä työssä vaaroja etsittiin pohtimalla työtehtäviä ja olosuhteita, joissa JET-laitetta käytettäisiin. Tässä hyödynnettiin edellä

esitettyjen eri riskianalyysimenetelmien periaatteita ja laadittua tarkistuslistaa. Tässä tapauksessa työn luonteen vuoksi ideoidenhakumenetelmänä käytettiin sovellettua aivo-riittä, jossa mietittiin ensin itse vaaralista, mikä sitten lähetettiin täydennettäväksi projektiin liittyville henkilöille. Kerätty vaaralista on esitetty liitteessä 1, liitteessä 2 on esitettynä apuna käytetty tarkistuslista.

Vaarat käytiin järjestelmällisesti läpi pohtimalla kunkin kyseessä olevaan vaaraan liittyvän riskin kuvaus, syy, todennäköisyys, seuraus ja suuruus. Riskien suuruudet vaaroille määritetään karkeasti, taulukkoa 9 apuna käyttäen. Vaarojen yksityiskohtainen läpikäynti on esitetty liitteessä 3. Merkittävimpiä riskejä analysoitiin vielä lopuksi erikseen.

Taulukko 9 Karkea riskin suuruuden määrittely [15]

tapahtuman todennäköisyys	seuraukset		
	vähäiset	haitalliset	vakavat
epätodennäköinen	1 merkityksetön riski	2 vähäinen riski	3 kohtalainen riski
mahdollinen	2 vähäinen riski	3 kohtalainen riski	4 merkittävä riski
todennäköinen	3 kohtalainen riski	4 merkittävä riski	5 sietämätön riski

Tämän karkean luokittelun avulla riskien suuruuksia voidaan verrata keskenään. Seuraavassa on esitetty taulukossa esiintyvien termien määritelmät.

Epätodennäköinen	Satunnainen vaaratilanne, joka esiintyy muutamia kertoja vuodessa tai harvemmin
Mahdollinen	Vaaratilanne esiintyy viikoittain tai lähes viikoittain
Todennäköinen	Vaaratilanne esiintyy päivittäin tai lähes päivittäin
Vähäiset	Lyhytkestoisia ohimeneviä vaikutuksia
Haitalliset	Pitkäkestoisia ohimeneviä vaikutuksia
Vakavat	Erittäin pitkäkestoisia ohimeneviä vaikutuksia, pysyviä haittoja tai vammoja, vammautuminen, kuolema
1 Merkityksetön riski	Riski on niin pieni, että toimenpiteitä ei tarvita
2 Vähäinen riski	Toimenpiteitä ei välttämättä tarvita, tilannetta tulee seurata
3 Kohtalainen riski	Ryhdyttävä toimenpiteisiin riskin pienentämiseksi, toimenpiteet, tulee mitoittaa ja aikatauluttaa järkevästi, jos riskiin liittyy vakavia seurauksia, on tarpeen selvittää tapahtuman todennäköisyys tarkemmin

4 Merkittävä riski	Riskin pienentäminen on välttämätöntä, toimenpiteet tulee aloittaa nopeasti, riskialtis toiminta pitää saada loppumaan nopeasti, eikä sitä saa aloittaa, ennen kuin riskiä on pienennetty
5 Sietämätön riski	Riskin poistaminen on välttämätöntä, toimenpiteet tulee aloittaa nopeasti. Riskialtis toiminta tulee keskeyttää eikä sitä saa aloittaa, ennen kuin riski on poistettu [16]

Kaikissa tai lähes kaikissa arvioituissa riskeissä on niiden toteutuessa seurauksena sähköisku tai ainakin sen mahdollisuuden huomattava kohoaminen. Sähköiskun seuraukset riippuvat hyvin monesta tekijästä, kuten kosketuksen kestosta ja tavasta sekä virran kulkutiestä ihmisessä. Sähköiskusta voi lisäksi tulla myös välillisiä vammoja esimerkiksi putoamisen johdosta. Näitä tekijöitä on hyvin vaikea ennustaa ja lähtökohtaisesti sähköiskun seurauksena onkin riskianalyysissä pidettävä vakavinta mahdollista eli hengenmenetystä. Muita seurauksia käsitellyistä riskeistä ovat esimerkiksi menetetty työaika.

5.2 Merkittävimmät riskit

Käsiteltyjen vaarojen joukosta voidaan nostaa esille muutamia merkittävimpiä laitteen käyttöön liittyviä riskejä. Nämä vaikuttavat oleellisesti siihen, voiko laitetta suositella käytettäväksi lisäturvalaitteena sähköratatoissa. Näitä ovat:

- Liika luottamus laitteeseen.
- Laitetta käytetään kohteissa, joihin se ei sovellu.
- Sähkökenttä ei anna luotettavaa tietoa jännitteettömyydestä.

”Liika luottamus laitteeseen” käsittää sen, että luotetaan laitteeseen ainoana jännitteettömyyden toteamisvälineenä. Nykyisten ohjeiden mukaan JET-laite ei ole hyväksytty jännitteenkoetin, vaan sitä tulisi käyttää vain lisäturvalaitteena. Tilanne on tietysti toinen, jos ohjeistusta muutetaan. Vaarana on, että JET-laitetta alettaisiin ohjeiden vastaisesti käyttää jännitteettömyyden toteamiseen sen helppouden vuoksi. JET-laitteella voi melko hyvällä varmuudella päätellä useimmissa tapauksissa, millainen on johtimen jännitetilanne. Turvaohjeiden rikkominen olisi silti vakava virhe. JET-laitteeseen saatettaisiin luottaa liikaa myös sillä tavoin, että sitä pidettäisiin hälytyslaitteena. Joissakin tilanteissa saatettaisiin olettaa sen hälyttävän taskusta, kun ollaan vaarallisen lähellä jännitteistä johdinta. Koska laite ei kuitenkaan näin toimi, voisi tällaisesta toimintata- vasta olla vakavat seuraukset.

”Käytetään kohteissa, joihin se ei sovellu”. Mitattaessa JET-laitteella sen tulisi olla vähintään 0,5 metrin päässä maadoitetuista kohteista. Avoradalla mitattaessa tämä ei ole kovin suuri ongelma, vaikkakin maadoitetut pylvää ja muut rakenteet voivat joissakin tilanteissa häiritä mittaustulosta. Jos tätä ei tiedosteta, se voi vaikuttaa mittaustuloksen tulkintaan. Johdon alta ja lähempää mitattaessa maadoitettuja kohteita ei kuitenkaan yleensä ole häiritsemässä mittausta. Muuntajakopissa tilanne on toinen, jos laitteen oletetaan toimivan siellä ja laitteen antaman tuloksen perusteella pidetään kohdetta jännit-

teettömänä, syntyy vakava vaaratilanne. Tämä on yksi merkittävimpiä riskejä laitteen käytössä. Käyttäjä saattaa helposti olettaa laitteen hälyttävän aina jos lähellä on suurjännitettä. Muuntajakopissa laite ei kuitenkaan välttämättä hälytä erilaisten maadoitettujen rakenteiden läheisyyden vuoksi. Sen erottaminen, missä laite toimii ja missä ei, voi aiheuttaa sekaannusta käyttäjissä ja samalla myös vaaratilanteita.

”Sähkökentän mittausta ei aina anna luotettavaa tietoa jännitteettömyydestä.” Kuten Comsol-mallinnuksen yhteydessä kappaleessa 4 on käsitelty, tällaisia tilanteita voi esiintyä. Useamman radan ollessa rinnan muiden ratojen johtimien aiheuttamat sähkökentät häiritsevät mittausta, eikä täyteen varmuuteen jännitteettömyydestä välttämättä päästä. Käytännössä ongelmaksi muodostuu sen erottaminen, onko johdin jännitteetön vai vaikuttaako siinä mahdollisesti pieni indusoitunut latausjännite. Sinänsä varsinaista vaaratilannetta ei tässä tapauksessa pitäisi syntyä, koska JET-laitteen antaman tuloksen perusteella täysin jännitteettömässäkin johtimessa on pieni jännite. Jos työmaadoitukset tehdään tässä tapauksessa oikealla tavalla, niin vaaraa ei synny. Vaaratilanne voi kuitenkin syntyä, jos tulosta tulkitaan virheellisesti ja mennään töihin kohteeseen varmistumatta työmaadoituksista.

Edellä kuvatut riskit ovat merkittävimpiä, mutta myös muita pienempiä riskejä löytyy. Yhteenvetona kaikista käsitellyistä riskeistä voidaan sanoa, että vaikka JET-laite on teknisesti toimiva, niin sen käyttöön liittyy myös potentiaalisia riskejä.

5.3 JET-laitteen avulla pienenevät riskit

JET-laitteen käyttöön liittyvien riskien lisäksi on myös riskejä, jotka JET-laitetta käyttämällä voivat pienentyä. Vaikka riskien toteutumisen todennäköisyys on pieni, niin niiden seurausten vakavuuden vuoksi riskit ovat kuitenkin merkittäviä. Monessa tapauksessa riski sähköiskun saamisesta pienenee käytännössä mitättömäksi, jos JET-laitteella tehtäisiin vielä viimeinen varmistus kohteen jännitteettömyydestä, ennen minimityöskentelyetäisyyden alittamista.

Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi lähestyttäessä jännitteistä johdinta, kun se virheellisesti oletetaan jännitteettömäksi. Tähän voi olla useita eri syitä. Maadoitukset ovat jääneet tekemättä, ne pettävät tai ne on tehty epähuomiossa väärään johtimeen. On myös mahdollista, että jokin kohteeseen jännitettä syöttävä johdin onkin jäänyt jännitteelliseksi, eikä sitä ole tarkistettu. Tämä voi joissain tapauksissa johtua virheellisistä tiedoista, esimerkiksi puutteellisesta ryhmityskaaviosta. Yksi mahdollinen riski on työskentelyrajojen ylittäminen, jolloin päädytään jännitetyö alueelle.

Vaikka nämä riskit pysyvät kohtuullisen pieninä, jos noudatetaan nykyisiä turvamääräyksiä, niin JET-laitteen avulla olisi mahdollista edelleen pienentää niitä erittäin alhaiselle tasolle.

6 HYÖTY JA SOVELTUVUUS

6.1 Sähköradoilla tapahtuneet sähkötapaturmat

JET-laitteella on tarkoitus lisätä turvallisuutta ja estää vaaratilanteita. Sähköradalla työskennellään haastavissa olosuhteissa, joissa on aina olemassa sähköiskun vaara. Monesti työtä vaikeuttaa myös säätila ja kiire. Yleensä vaaratilanteet ja onnettomuudet aiheutuvatkin kiireen, väsymyksen ja huomiokyvyn heikkenemisen vaikutuksesta.

Sähköradalla sattuneista sähköön liittyvistä onnettomuuksista ei ole erillistä tilastointia, mutta TUKES:lta löytyy tiedot kuolemaan johtaneista sähkötapaturmista ja VARO tiedotteita muista sähkötapaturmista. Tähän lukuun on koottu edellä mainituista lähteistä sähköradalla sattuneita sähkötapaturmatapauksia.

Vuosilta 1980 – 2014 (maaliskuu) löytyi 12 sähköön liittyvää kuolemantapausta sähköradalta. Näistä kuitenkin vain yhdessä uhrina oli työntekijä, kyseinen tapaus on vuodelta 2006. Muissa tapauksissa maallikko oli saanut kuolettavan iskun kiivettyään junanvaunun katolle tai muuhun rakenteeseen. Kuolema oli seurannut joko suoraan sähköiskusta tai sähköiskun ja putoamisen tuottamien vammojen yhteisvaikutuksesta. [17] Tässä työssä tarkasteltavalla JET-laitteella on tarkoitus parantaa työntekijöiden turvallisuutta, joten ulkopuolisille sattuneita tapaturmia ei tässä tarkemmin käsitellä.

TUKES:in julkaisemista VARO tiedotteista löytyi, viimeisiltä kymmeneltä vuodelta muutamia läheltä piti ja onnettomuustapauksia. Kaikkia läheltä piti tilanteita ei luultavastikaan raportoida eikä aina välttämättä edes havaita tai tiedosteta. Seuraavassa tarkastellaan joitakin onnettomuuksia pääpiirteissään ja pohditaan samalla jokaisen onnettomuuden kohdalla lyhyesti, olisiko JET-laitteesta voinut olla apua kyseisessä tilanteessa.

Kuolemaan johtanut tapaus 2006.

Sähköyliasentaja kiipesi pylvääseen vaihtamaan pylväässä olevan muuntajan etusulaketta. Muuntaja oli jännitteinen ja asentaja sai sähköiskun, putosi maahan ja kuoli paikanpäällä. Muuntajaa syöttävää ratajohtoa ei ollut tehty jännitteettömäksi, koska käytössä oli ollut virheellinen ryhmityskaavio. Ryhmityskaavion mukaisesti muuntajaa syöttävä ajojohto oli tehty jännitteettömäksi, sen jännitteettömyys todettu ja johto työmaadoitettu. Muuntajan todellista kytkentää ratajohtoon ei kuitenkaan ollut varmistettu paikanpäällä eikä jännitteettömyyttä ollut todettu riittävän läheltä työkohdetta. Jos käytössä olisi ollut JET-laite, jännitteettömyys olisi ollut helpompaa todeta myös työkohteen lähellä. Päällä oleva JET-laite olisi myös mahdollisesti hälyttänyt pylvääseen noustessa taskustakin. Hälytykseen olisi mahdollisesti reagoitu ja alettu tutkia tilannetta tarkem-

min. JET-laitetta ei tietenkään välttämättä olisi käytetty lisävarmistuksena, koska usko jännitteettömyyteen oli vahva.

2010

Nostokorissa työskennellyt asentaja sai sähköiskun viimeistellessään ajolankaa käyttöönottoa varten. Sähköradan muutostöitä tehtiin suunnitellulla jännitekatkolla ja työmaadoitukset ja jännitteettömyyden toteaminen oli suoritettu asianmukaisesti. Ajolanka oli kiertynyt ja sitä suoristaessa asentaja kurottautui eristimen yli saaden sähköiskun ja tuupertuen korin lattialle. Eristimen toisella puolella oleva kytkentäryhmä oli jännitekatkon ulkopuolella, mitä työryhmä ei tiedostanut. JET-laite olisi tässä tilanteessa saattanut estää onnettomuuden, jos sillä olisi varmistettu kohteen jännitteettömyys työn kuussa. JET-laite olisi päällä ollessaan varoittanut lähellä olevasta jännitteisestä langasta luultavasti molemmilla asennoilla. Jos lähistöllä oli muita jännitteellisiä ajolankoja, ETÄ-asento olisi luultavasti hälyttänyt koko ajan eikä siihen olisi kiinnitetty huomiota. LÄHI-asento olisi luultavimmin antanut ymmärrettävän varoituksen.

2009

Asentaja sai sähköiskun ajolankaa irrottaessa. Tarkoituksena oli asentaa eristin M-johtimeen, joka oli hankalassa paikassa. Ajolanka olisi työn takia irrotettava. Asentajat varmistivat kytkentärajat ja sen, että kyseessä oli oikea ajolanka. Toisen puolen työmaadoitus tehtiin, mutta toisen puolen maadoitus jäi tekemättä huomion harhaannuttua. Ajolankaan indusoitui jännite viereisistä johtimista ja siihen tarttunut asentaja sai sähköiskun. Asiasta ilmoitettiin työnjohdolle ja uhria kehoitettiin hakeutumaan lääkäriin. Jos JET-laitteella olisi tarkastettu jännitteettömyys vielä ylhäältä korista, olisi indusoitunut jännite luultavasti havaittu.

2007

Asentaja sai sähköiskun paluujohtinta portaalista irrottaessaan. Paluujohtin oli katkenut ja kietoutunut portaalin ympärille. Asentaja pyysi jännitekatkon ja totesi jännitteettömyyden ajolangasta. Paluujohtimeen koskettaessaan hän kuitenkin sai sähköiskun ja putosi kaapelikourun päälle. Paluujohtimessa oli jännite luultavasti muista johtimista indusoituneena. Työmaadoituksia ei ollut tehty ja asentaja työskenteli yksin. Jet-laite olisi saattanut hälyttää indusoituneesta jännitteestä, jos sitä olisi käytetty.

2006

Asentaja meni liian lähelle katkennutta jännitteistä 25 kV johdinta. Etäisyys johtimeen oli noin 1 m, ohjeellinen suojaetäisyys tällaisessa tapauksessa on 20 m, onnettomuudelta kuitenkin välttyttiin. Johtimen jännitteettömyyttä ei ollut todettu. JET-laitteella jännitteen toteaminen olisi ollut helppo tehdä etäältä.

[18]

Tässä tarkasteltiin muutamia onnettomuustilanteita, joita on viime vuosina sattunut. Lähes kaikissa onnettomuuksissa oli rikottu turvaohjeita jotenkin, esimerkiksi työmaadoitus oli jäänyt tekemättä. Osassa tapauksista JET-laitteesta olisi voinut olla hyötyä ja vaaratilanne olisi mahdollisesti jäänyt syntymättä. Hyötyä laitteesta olisi kuitenkin ollut vain, jos sitä olisi todella käytetty. Sen arvioiminen, olisiko laitetta todella käytetty, on kuitenkin melko vaikeaa.

6.2 JET-laitteella saavutettavat hyödyt ja sen soveltuvuus sähköratatöihin

Mitä hyötyjä JET-laitteen käytöllä voitaisiin saavuttaa ja miten se soveltuu sähköratatöihin? Tarkoitushan työmenetelmiä parannettaessa on lisätä työn turvallisuutta ja samalla myös mahdollisesti helpottaa ja tehostaa työntekoa. JET-laitteella pyritään ensisijaisesti parantamaan sähköradalla työskentelevien turvallisuutta ehkäisemällä sähköiskuja, jotka johtuvat siitä, että jännitteistä kohdetta ei ole tunnistettu. JET-laitetta voidaan kuitenkin käyttää tähän useammalla hieman erilaisella vaihtoehtoisella käyttötavalla.

JET-laitteesta saatavia hyötyjä voidaankin pohtia sen mahdollisten käyttötapojen pohjalta. JET-laitettahan on käyttöohjeiden mukaan tarkoitus käyttää perinteisen jännitteentoteajan rinnalla, laitteena jolla voidaan tarvittaessa helposti tutkia kohteen jännitteettömyyttä. Voidaan kuitenkin pohtia myös sitä vaihtoehtoa, että voisiko se toimia yksinään myös hyväksyttynä jännitteentoteajana. Myös JET-laitteen toimimista automaattisesti hälyttävänä laitteena ja siitä saatavia hyötyjä voidaan tarkastella, vaikka tähän toimintaan kyetäkseen laite vaatisikin joitakin parannuksia.

Pohditaan aluksi tämänhetkistä (ja tämän työn tehtävänasettelussa määriteltyä) tilannetta, jossa JET-laite toimisi lisäturvallitteena. JET-laitteella siis tarkastettaisiin haluttaessa johtimen tai jonkin muun kohteen jännitteisyyttä ”virallisen” jännitteen toteamisen ohessa. Varsinainen jännitteettömyyden todentaminen ennen maadoitusten tekoa suoritettaisiin edelleen perinteisillä jännitteenkoettimilla. JET-laitetta käytettäisiin siis vain aina tarvittaessa lisävarmistuksena. Laitetta voitaisiin myös käyttää maadoitettavan johtimen etsimiseen, jonka jälkeen sen jännitteettömyys voitaisiin varmentaa. Oltaessa lähellä johdinta esimerkiksi nostokorissa, JET-laitteella voisi tehdä vielä lisävarmistuksen jännitteettömyydestä, ennen kuin minimityöskentelyetäisyys alitetaan.

Jos näin tehtäisiin rutiininomaisesti aina johdinta lähestyttäessä niin riski, että vahingossa mentäisiin liian lähelle jännitteellistä johdinta, olisi hyvin pieni. Tästä voitaisiin tehdä pakollinen menettely ohjeita muuttamalla. Useamman rinnakkaisen johdon tapauksessa on mahdollista syntyä tilanne, jossa JET-laitteen antaman tuloksen perusteella ei pystytä varmasti sanomaan onko johtimessa pieni jännite vai ei lainkaan jännitettä. Tätä on käsitelty enemmän kappaleessa 3.2.1. Merkittävä näkökohta on kuitenkin se tulisiko tällaista laitetta työntekijöiden käytettyä, jos he ovat tyytyväisiä nykytilanteeseen eikä laitteen käyttö ole ohjeiden mukaan pakollista. Jos laitteen käyttö jäisi vähäiseksi, niin myös sillä saavutettavat hyödyt luonnollisesti pienenevät.

Toinen mahdollinen käyttötapa JET-laitteelle olisi, että JET-laite toimisi lisäksi automaattisena hälytyslaitteena. Hälytyslaitteena toimimisella tarkoitetaan, että JET-laite hälyttäisi lähestyttäessä jännitteistä kohdetta ilman mitään erillistä toimenpidettä. Hälytyksen pitäisi luonnollisesti olla selvästi havaittavissa.

Toimiakseen hälytyslaitteena JET-laite vaatisi joko lisäanturin tai koko laitteen kiinnityksen takkiin tai kypärään sellaiseen paikkaan että laite toimisi luotettavasti. Langallisesta lisäanturista on prototyyppi olemassa ja se on ollut tutkittavana. Langallisen anturin lanka muodostaa kuitenkin käytettävyy- ja luotettavuusongelman. Langaton anturi taas vaatisi jonkinlaisen sisäisen virtalähteen ja lähettimen. Kiinnitys takkiin taas on ongelmallinen, koska sähkökenttä vääristyy kehon lähellä. Käytännössä hälytyslaitteena käytettäessä kypäräkiinnitys olisi luultavasti paras paikka. Siinäkin on kuitenkin omat ongelmansa esimerkiksi laitteen päällä olemisen ja mittausasennon valinnan suhteen. Myös laitteen kiinnittämistä työkoneeseen on suunniteltu.

Tällaisen hälytyslaitteen hyödyt olisivat kuitenkin merkittävät, jos laite toimisi luotettavasti. Jännitteisestä kohteesta saataisiin varoitus vielä johtimen läheltä, jos muista varotoimista huolimatta oltaisiin kuitenkin lähestymässä jännitteistä johdinta. Yleensä onnettomuudet aiheutuvat usean asian seurauksena. Tässä tapauksessa muiden turvajärjestelyjen petettyä olisi vielä yksi erillinen lisäturva, joka saattaisi estää onnettomuuden.

Yksi mahdollinen käyttötapa JET-laitteelle olisi se, että se toimisi yksinään hyväksyttynä jännitteen toteajana. Laitteella voitaisiin siis todeta kohteen jännitteettömyys ennen sen työmaadoittamista. Käytännössä jännitesyötöstä erotetussa johtimessa saattaa olla pieni indusoitunut latausjännite, mikä kuitenkaan ei estä maadoittamista. JET-laitteen antaman tuloksen perusteella voi selvästi havaita, ettei johtimessa ole käyttöjännitettä ja sen perusteella johdin voitaisiin maadoittaa työmaadoitusohjeiden mukaisesti. Näin välttäisiin perinteisen jännitteen toteamismittauksen kantamiselta ja säästettäisiin aikaa nopeammalla toteamisella. Tämän lisäksi JET:aa voisi tietysti käyttää myös lisäturvavälineenä tarvittaessa. JET:n käyttö jännitteettömyyden toteajana tulisi kuitenkin rajata koskemaan vain avoimessa tilassa olevia johtimia, eikä sitä tulisi käyttää esimerkiksi kytkinasemilla ja veturihalleissa. Näissä kohteissa JET:n antama tulos saattaa olla harhaanjohtava. Jos JET-laitetta voisi käyttää tällä tavoin jännitteettömyyden toteamiseen ennen työmaadoittamista, niin se tulisi myös käytännössä käyttöön ja sitä voitaisiin käyttää myös lisäturvavälineenä helpommin. Jännitteen toteajaksi hyväksyminen vaatisi kuitenkin, että laite täyttäisi sille määritellyt vaatimukset. Tällä hetkellä on olemassa lausuntokierroksella oleva standardi, joka voisi hyvinkin soveltua tälle laitteelle. JET-laite vaikuttaisi täyttävän pääpiirteissään standardiluonnoksessa esitetyt vaatimukset tämänkaltaisesta laitteesta. [19]

JET-laite tulisi olemaan ympärivuotisesti ulkokäytössä, jolloin sen täytyisi toimia luotettavasti kaikissa sääolosuhteissa. Suomessa sääolosuhteet vaihtelevat melkoisesti ja laitteelle käyttöohjeessa luvattu lämpötilarajat ylittyvät ainakin toisinaan. Myös laitteen luvattu vedenkestävyys on heikompi, kuin olisi tarpeellista. Nämä puutteet heikentävät laitteen tämänhetkisen version soveltuvuutta sähköratatöihin, mutta ovat kuitenkin tuotekehityksellä ratkaistavissa.

6.3 JET-laitteen kustannukset ja mahdolliset haitat

Uuden laitteen käyttöönotosta aiheutuu väistämättä erilaisia kustannuksia. Merkittäviä kustannuksia aiheutuu esimerkiksi laitteen hankinnasta ja työntekijöiden kouluttamisesta. Tässä tapauksessa tutkittavaa JET-laitetta täytyisi hankkia useita kappaleita. Jokaiselle työntekijälle tulisi käytännössä olla oma laitteensa, jotta työturvallisuus paranisi. Hinnaksi laitteelle on arvioitu 500€ kun laitetta päästään valmistamaan isommissa erissä.

Laitteen käyttöön täytyy käytännössä järjestää kattava koulutus sen turvallisen käytön takaamiseksi. Etätoteajan käyttöön liittyvien riskitekijöiden vuoksi on erittäin tärkeää, että riittävällä koulutuksella varmistetaan kaikkien käyttäjien ymmärtävän laitteen toimintaperiaatteen ja siihen liittyvät riskit. Tästä aiheutuu myös huomattavia kustannuksia. Käytännön työssä laite ei toisaalta aiheuta merkittäviä kustannuksia. Laitteen käyttö on nopeaa, joten se ei merkittävästi hidasta työtä.

Vaikka laite toisaalta tuo lisää turvaa oikein käytettynä, niin väärinkäytettynä se voi olla mukana vaaratilanteiden synnyssä, kuten luvusta 5 käy ilmi. Erityisen ongelmallista on laitteen mahdollinen käyttö muualla kuin junaradalla, esimerkiksi veturihallissa ja muuntamoissa. Näissä kohteissa laitteen antaman tuloksen perusteella ei tarpeeksi selkeästi pysty tulkitsemaan jännitteisen kohteen läheisyyttä erilaisten maadoitettujen rakenteiden aiheuttaman sähkökentän deformaation vuoksi. Laitteelle tulisi selkeästi määrittää kohteet, joissa sitä saa käyttää ja kohteet joissa sitä ei saa käyttää. Lisäksi laitteen käyttäjät on koulutettava erityisen huolellisesti siten, että he varmistetusti ymmärtävät laitteen toimintaperiaatteen, sähkökentän muodostumisen ja deformaation sekä tätä kautta syyt miksi laitetta ei saa käyttää kuin sille sallituissa ympäristöissä.

Työt sähköradalla tehdään usein junaliikenteen ehdoilla, jolloin aikaikkuna työlle voi olla melko lyhyt. Tällöin kaikki ylimääräinen toiminta vie aikaa itse työn suorittamisesta. Vaikka JET-laitteen käyttö on nopeaa, se voisi helposti myös jäädä tekemättä varsinkin, jos se ei ole pakollista, eikä sitä pidetä tarpeellisena.

6.4 Yhteenveto hyödyistä, kustannuksista ja soveltuvuudesta

JET-laitteella voitaisiin epäilemättä parantaa työturvallisuutta jonkin verran. Lisäturvallitteena JET:n hyödyt nykytilanteeseen verrattuna eivät kuitenkaan ole kovin merkittävät. Tämä johtuu lähinnä siitä, että laitteen käyttö käytännön työssä jäisi testikäyttäjien palautteen perusteella todennäköisesti melko vähäiseksi. Haastatteluiden perusteella laitteen käytölle ei nähdä todellista tarvetta, koska nykyisten ohjeiden mukaan toimittessa toiminta koetaan asentajien keskuudessa turvalliseksi. Kaksinkertainen varmistus jännitteettömyydestä olisi hyvä, mutta käytännössä tästä tuskin tulisi rutiinia. Eräs vaihtoehto olisi tietenkin tehdä tästä varmistuksesta pakollinen toimenpide, jolloin se tulisi osaksi rutiinia. Merkittävä ongelma lisäturvallitteessa on, että se mahdollisesti voisi helpompana vaihtoehtona käytännössä korvata ohjeidenmukaisen jännitteettömyyden

toteamisen. Tällaiseen ohjeiden rikkomiseen voisi olla merkittävä houkutus esimerkiksi tilanteessa, jossa jännitteenkoetinta ei ole lähettyvillä, mutta JET on mukana.

Jos JET-laitetta kehitettäisiin edelleen ja se toimisi luotettavasti automaattisena hälytyslaitteena, tilanne hyödyn suhteen olisi toinen. Hälytyslaitteena siitä voisi monessa tilanteessa olla merkittävää hyötyä työturvallisuudelle. Tätä varten laite vaatisi vielä kuitenkin kehitystä. Hälytyslaitteena toimimiseen tuo haastetta se, että usein työskennellessään tietoisesti minimityöskentelyetäisyyden päässä jännitteisestä johtimesta, jolloin laite hälyttäisi jatkuvasti, mikä taas häittäisi työntekoa.

Hyväksyttynä jännitteen toteajana laite nopeuttaisi maadoittamista ja vähentäisi työvälineiden liikuttelua, kun perinteistä jännitteen toteajaa ei tarvittaisi erikseen mukana. Tästä saatavan hyödyn suuruutta on kuitenkin vaikea arvioida. Jos JET-laite olisi jatkuvassa käytössä, sitä tulisi näin ehkä helpommin muutenkin käytettyä jännitteettömyyden varmistamiseen. Laitteen käyttöön, erityisesti ainoana jännitteenkoettimena käytettäessä, liittyy kuitenkin riskejä. Yksi riskeistä on muun muassa se, että laite ei sovellu käytettäväksi kaikissa käyttöympäristöissä, minkä vuoksi perinteisiäkin jännitteenkoettimia tarvittaisiin aina JET-laitteen rinnalla esimerkiksi veturihalleissa työskenneltäessä. Sähköradalla työskenneltäessä JET-laite voisi riittää yksinään. Useat erilaiset jännitteenkoettimet lisäävät virhetoimintojen mahdollisuutta ja siten myös riskejä.

JET-laite olisi pienin parannuksin teknisesti soveltuva jännitteettömyyden toteamiseen, joko lisäturvalaitteena tai virallisena jännitteen toteajanakin. Jos laitetta haluttaisiin käyttää virallisena jännitteen toteajana, täytyisi sille kuitenkin myös saada hyväksyntä sellaiseksi. Muut haasteet liittyvät lähinnä laitteen hintaan, käytettävyyteen ja siihen koetaanko kyseisen tapaiselle laitteelle tarvetta käyttäjien keskuudessa.

7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän diplomityön tavoitteena oli tutkia uuden Jännitteen etätoteajalaitteen (JET) soveltuvuutta ja turvallisuusvaikutuksia sähköratatöissä. Työssä tutustuttiin Suomen rautateiden sähköjakelun toimintaan ja erityisesti sähköradan kunnossapitoon. Tutustuttaessa sähkörataan kävi selväksi, että se on sähkötyöturvallisuuden kannalta haasteellinen toimintaympäristö. Tähän vaikuttavat muun muassa toimiminen junaliikenteen ehdoilla ja useat rinnakkaiset ja varsin lähekkäiset johtimet. Sähköradan kunnossapidosta onkin laadittu Sähkörataohjeet turvallista työskentelyä varten sähköradalla. Työssä tutustuttiin näihin ohjeisiin ja erityisesti jännitekatkoon liittyviin menettelyihin. Näitä ohjeita noudattamalla sähköradalla voidaan työskennellä turvallisesti.

Onnettomuuksia voi kuitenkin tapahtua ja työturvallisuutta on aina syytä pyrkiä entisestään parantamaan, etenkin tällaisessa ympäristössä jossa esiintyy suurjännitteitä ja onnettomuuksien seuraukset ovat lähes aina vakavat. JET-laite onkin tarkoitettu juuri tähän tarkoitukseen. Tämän työn tehtävänasettelussa lähdettiin liikkeelle siitä, että laite tulisi vapaaehtoisesti käytettäväksi lisälaitteeksi, vaikka sen käyttöön voitaisiin tietysti myös ohjeistaa. Työssä tutkittiin toimiiko laite kuten pitää ja toisaalta millaista hyötyä sen käytöllä voitaisiin saavuttaa. Koska laite perustuu sähkökentänvoimakkuuden mittaamiseen, haluttiin selvittää millaisia sähkökenttiä sähköradalla esiintyy. Tässä käytettiin apuna laskennallista mallinnusta. Mallinnuksista havaittiin, että sähkökentän jakautuminen ratajohdon ympäristössä ei ole tasaista. Eräs merkittävä huomio mallinnusten pohjalta oli, että sähkökentän perusteella ei pystytä etäältä luotettavasti erottamaan onko johtimessa pieni latausjännite vai ei jännitettä lainkaan, jos mittauspaikan lähistöllä on muita sähkökentän lähteitä.

JET-laitteen toimintaa suurjännitelaboratoriossa ja sähköradalla tutkittaessa havaittiin laitteen toimivan odotusten mukaan ja luotettavasti niissä kohteissa joissa laite on suunniteltu käytettäväksi. Sellaisissa kohteissa joissa ympärillä on maadoitettuja rakenteita, JET-laite ei toimi luotettavasti. Kun laitteeseen ja sen rakenteeseen on tutustuttu, niin voidaan sanoa, että teknisesti laite on riittävän hyvä ja luotettava käytettäväksi sähköratatöissä nimenomaan lisäturvallitteena, jonka rinnalla käytetään myös perinteistä galvaanista jännitteentoteajaa. Testikäyttäjiltä saadun palautteen perusteella JET-laitteen suurin puute onkin se, että sitä kohtaan ei tällaisena lisäturvallitteena koeta olevan riittävästi tarvetta käyttäjien keskuudessa.

Riskianalyysin perusteella löydetty riskit myös heikentävät laitteen soveltuvuutta. Oikein käytettynä laite parantaa työturvallisuutta, mutta jos sitä käytetään väärin tietämättömyyden tai piittaamattomuuden vuoksi, voi se myös edesauttaa joidenkin riskien

toteutumisessa. Lisäturvallisuuteen JET:n tuoma hyöty työturvallisuuteen ei luultavasti olisi kovinkaan merkittävä, erityisesti arvioidun vähäisen käytön johdosta.

Työssä pohdittiin myös JET:n mahdollisuuksia toimia muutoin kuin vain lisäturvallisuuteen. Virallisena jännitteentoteajana JET korvaisi siis perinteisen jännitteentoteajan käytön ennen työmaadoitusten tekemistä. JET ei voisi rajoituksistaan johtuen kuitenkaan täysin korvata perinteisen jännitteentoteajan käyttöä esimerkiksi kytkinasemilla ja veturihalleissa sekä tilanteissa, jossa täytyisi varmistua johtimen olevan täysin jännitteetön. Viralliseksi jännitteentoteajaksi hyväksyminen vaatisi lisäksi standardin mukaisen hyväksynnän.

Hälytyslaitteena, joka automaattisesti varoittaisi liian lähellä olevasta jännitteisestä rakenteesta, JET ei nykymuodossaan toimi ja testattavana olleen lisäanturin kanssa käyttö on liian epäkäytännöllistä. Tällaisesta hälytyslaitteesta voisi moitteettomasti toimituksessaan olla kuitenkin hyötyä ja JET:sta voisi olla mahdollista kehittää sellainen. Ehkäpä kiinnostavin mahdollisuus tähän on JET-laitteen suunnitteilla oleva kypäräkiinnitys.

JET-laitteen taustalla oleva idea mahdollisuudesta helposti tarkastella kohteiden jännitteettömyyttä ja näin lisätä työturvallisuutta on hyvä. Myös laitteen tekninen toteutus rajoituksistaan ja kehittämistarpeistaan huolimatta on toimiva ja luotettava. Laitteen soveltuvuus sähköratatöihin ei kuitenkaan ole niin hyvä kuin voisi toivoa. Tähän ehkä suurimpana syynä on sähkörataympäristön monimutkaisuus verrattuna esimerkiksi siirto- ja jakeluverkkoihin. Niissä tämän tyyppisen laitteen kanssa toimiminen on selkeämpää ja siten myös laitteen soveltuvuus parempi. Sähköratatöissä voitaisiin laitetta käyttämällä jonkin verran parantaa työturvallisuutta, mutta toisaalta sen käytöstä löytyy myös potentiaalisia riskejä. Näiden riskien johdosta JET-laitteen käyttö vaatisi erityisen kattavan koulutuksen, jotta käyttäjillä olisi selvä ymmärrys laitteen toiminnasta ja sallituista käyttökohteista. Käyttökohteet tulisi turvaohjeissa selkeästi rajata kohteisiin, joissa laitteen antamasta tuloksesta pystyy selkeästi päättämään kohteen jännitteellisuuden.

Jo nykyiset turvaohjeet mahdollistavat turvallisen työskentelyn sähköradalla, kun niitä noudatetaan tarkasti. Ne myös melko tarkkaan määrittelevät käytetyt prosessit, jolloin JET-laitteen vapaaehtoinen käyttö niiden rinnalla saattaisi jäädä vähäiseksi. Yritykset voivat tietysti halutessaan lisätä JET:n käytön mukaan omiin turvallisuuskäytäntöihinsä, jolloin työntekijöiden tulisi sitä käytettyä. Oikein käytettynä JET on hyvä laite ja parantaa työturvallisuutta. Sitä voidaan kehittämällä myös edelleen parantaa ja sen käyttötapoja lisätä. Turvallinen työskentely sähköradalla on kuitenkin nykymentetyjen puitteissakin mahdollista.

LÄHTEET

- [1] Liikenneviraston ohjeita 21/2013. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 5 Sähköistetty rata. 2013, ISBN 978-952-255-286-0. 109 s.
- [2] Vilppo Olli. Liikenneviraston ratajohtoverkkotoiminnan velvoitteet ja mahdollisuudet avoimilla sähkömarkkinoilla. Diplomityö. Tampere 2014. Tampereen teknillinen yliopisto. Teollisuustalous. 70 s.
- [3] Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2013. Reponen Juho. Sähköradan syöttöasemien yliaaltosuodattimen mitoitus. Insinööritoimisto 2013. Metropolia ammattikorkeakoulu. ISBN 978-952-255-321-8. 45 s.
- [4] Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 1/2005. Tomi Anttila. Sähkörata maadoitusten perusteet – suoja-aidat, rakennukset ja laiturirakenteet. Insinööritoimisto. Helsinki 2005. Helsingin ammattikorkeakoulu, Sähkövoimatekniikka. ISBN 952-445-117-4. 55 s.
- [5] Alanko Tommi, Leikas Matti, Aschen Carita, Hietanen Maila, Sähkömagneettisten kenttien kartoitus Ratahallintokeskuksen hallinnoimalla rataverkolla. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 2/2009, ISBN 978-952-445-270-0. 32 s.
- [6] SFS6002. Sähkötyöturvallisuus. 2. painos. 2005. Suomen standardisointiliitto. 57 s.
- [7] Liikenneviraston ohjeita 1/2012. Radanpidon turvallisuusohjeet (TURO). 2012. ISBN 978-952-255-080-4. 90 s.
- [8] Ratahallintokeskuksen julkaisuja B 22. Sähkörataohjeet. Helsinki 2009. ISBN 978-952-445-272-4. 47 s.
- [9] Korpinen Leena, Isokorpi Jari, Keikko Tommi. Kartoitus pientaajuisista sähkökentistä elin- ja työympäristössä. Tampereen teknillinen korkeakoulu. 1998. 31 s.
- [10] Martti Aro, Jarmo Elovaara, Matti Karttunen, Kirsi Nousiainen, Veikko Palva, Suurjännitetekniikka, toinen korjattu ja täydennetty painos, yliopistokustannus/Otatietao, 2003, ISBN 951-672-320-9. 520 s.

- [11] Erkki Voipio, Sähkö- ja magneettikentät, 3. painos. 1976, Otakustantamo, ISBN 951-671-123-5. 381 s.
- [12] Sauramäki Tuomas, Keikko Tommi, Korpinen Leena, Väestön altistuminen laajakaistaisille sähkö- ja magneettikentille. Tampereen teknillinen yliopisto 2002. 52 s.
- [13] Patentti- ja rekisterihallitus, Hyväksyvä välipäätös 6.10.2014, patenttihakemus nro.20130014
- [14] Erkki Voipio, Kenttäteoria, Otakustantamo, 1979, ISBN 951-672-014-5 390 s.
- [15] VTT Riskianalyysit
http://www.vtt.fi/proj/riskianalyysit/riskianalyysit_menetelmat.jsp
20.6.2014
- [16] BS 8800:fi. Ohje työterveys – ja –turvallisuusjohtamisjärjestelmistä. 1997. Suomen standardisoimisliitto. 87 s.
- [17] TUKES Kuolemaan johtaneet sähkötapaturmat 1980–2013
<http://www.tukes.fi/fi/Rekisterit/sahko-ja-hissit-rekisterit/sahkotapaturmat/> 15.6.2014
- [18] TUKES VARO-rekisteri. <http://varo.tukes.fi/> 15.6.2014
- [19] Standardiluonnos. IEC/TR 61243-6: Live working – Voltage detectors Part 6: Guidelines on non-contact voltage detectors (NCVD) for use at nominal voltages above 1 kV a.c. 40 s.

LIITE 1: VAARALISTA

Laitteeseen liittyvät

Laite ei toimi

Laite toimii väärin

Laitteen käyttöön liittyvät vaarat

Liika luottamus laitteeseen.

Väärät käsitykset laitteen toiminnasta.

Valitaan mittauskohta väärin.

Käytetään kohteissa, joihin laite ei sovellu.

Käytetään väärää mittausasentoa.

Väärä ote laitteesta.

Tulkitaan laitteen antama tulos väärin.

Laitteen antamaa hälytystä ei havaita.

Mittauskohdan sähkökenttä ei anna tietoa jännitteisen johtimen läheisyydestä.

Laite ei ole mukana.

Laitetta ei käytetä.

Työssä esiintyvät vaarat, joita laite voisi pienentää

(Tekemällä lisävarmistus jännitteettömyydestä JET-laitteella)

Lähestytään jännitteellistä johdinta.

Viallinen jännitteenkoetin ei ilmaise jännitettä.

Ylitetään työskentelyrajat vahingossa.

Oletetaan jännitteettömyys.

Maadoitus on jäänyt tekemättä tai pettää.

Virheelliset tiedot sähkökytkennöistä

LIITE 2: TARKISTUSLISTA

Laite ja sen käyttö

1. Toimiiko laite
 - Toimiiko laite oikein
2. Käytetäänkö laitetta
 - Käytetäänkö laitetta oikein
 - Miksi ei käytetä
3. Miten laitetta käytetään väärin
 - Mittausasento
 - Mittauskohta tai kohde
 - Ote laitteesta
 - Tuloksen tulkinta
4. Miksi laitetta käytetään väärin

Pienennettävät riskit

1. Sähköisku jännitteisestä kohteesta
2. Miksi on lähestytty jännitteistä kohdetta
3. Mitä on jäänyt tekemättä
 - jännitteettömyyden toteaminen
 - maadoitukset
 - muu
4. Miksi toimenpide on jäänyt tekemättä

LIITE 3: VAAROJEN LÄPIKÄYNTI

JET-laitteen vaarat

Vaarat on käyty läpi ja riskien suuruus arvioitu ajatellen, että JET-laitetta on käytetty ainoana jännitteettömyyden todentamismenetelmänä. Tämä siksi, että jos ajateltaisiin kaikkia turvamääräyksiä noudatetun, niin riskien suuruudet jäisivät kaikissa tapauksissa vähäisiksi ja JET-laitteen vaikutusta olisi vaikea arvioida.

Laite ei toimi

Kuvaus:

Kytettäessä laite päälle mitään ei tapahdu. Laitteen normaali toiminta kytkettäessä laite päälle olisi, että vihreä on/off merkkivalo syttyy ja kaikki ledit, värinä ja summeri kytkeytyvät päälle hetkeksi.

Syy:

Laitteen toimimattomuus voi johtua kahdesta syystä, akun tyhjentymisestä ja laitteen rikkoontumisesta. Käsitellään näitä seuraavaksi erikseen.

Akku tyhjentynyt

Kuvaus:

Käynnistettäessä laitetta akku on tyhjä. Akku on tyhjentynyt, joko käytöstä johtuen tai purkaantunut itsestään ajan kuluessa. Laitetta ei myöskään ole tyhjentymisen jälkeen ladattu. Akun ikääntyessä sen kesto pienenee ja se tarvitsee ladata useammin.

Todennäköisyys:

Laitteessa on varoitusvalo akun alhaisesta kapasiteetista. Jos laitetta käytetään säännöllisesti, niin se myös luultavasti ladataan pian varoitusvalon syttymisen jälkeen. Kuitenkin jos laitetta käytetään vain satunnaisesti, myös lataaminen voi jäädä tekemättä. Laitteen akku pitää ainakin uutena varauksensa hyvin. Laitteen mukana tulevat sekä verkko-laturi, että autolaturi.

Suuruus:

Vähäinen riski.

Laite rikkoontunut

Syy:

Laitteen rikkoontumiseen voi johtaa sen putoaminen korkealta, sen kastuminen tai muu vika.

Seuraukset:

Laite ei toimi, joten mittausta ei pystytä suorittamaan. Laitteen antamaa lisäturvaa ei voida hyödyntää. Voi johtaa myös sähköiskun vaaraan, jos mitään muuta menetelmää ei käytetä jännitteettömyyden toteamiseen, vaan luotetaan pelkkään oletukseen jännitteettömyydestä.

Todennäköisyys:

Laite on pieni ja sen kanssa työskennellään myös korkealla, esimerkiksi nostokorissa. Laitteessa ei ole rannelenkkiä, joka pienentäisi pudottamisen riskiä. Tästä johtuen pudottamisen vaara on melko suuri. Laite kestää pienen pudotuksen, mutta ei välttämättä korkealta esimerkiksi nostokorista putoamista.

Laite voi kastua käytettäessä, koska usein joudutaan työskentelemään myös vesisaatteissa. Laite kestää jonkin verran kosteutta, mutta se ei ole täysin vedenpitävä. Käyttöohjeissa kielletään käyttö voimakkaassa sateessa ja kerrotaan kotelointiluokaksi IP 42 erillisen lataussuojatulpan ollessa paikoillaan. Irrallisen suojatulpan tallessa pysyminen pitemmän ajan kuluessa on kuitenkin melko epätodennäköistä. Kun suojatulppa ei ole paikoillaan laitteen latausliitin on avoinna ja alttiina vedelle.

Suuruus:

Merkittävä riski

Laite toimii väärin

Kuvaus:

Laite ei ilmaise todellista sähkökentän suuruutta jonkin laitteessa olevan vian vuoksi.

Syy:

Väärä toiminta voi johtua laitteen vikaantumisesta esimerkiksi edellä mainittujen pudottamisen tai kastumisen johdosta tai jostain muusta tuntemattomasta syystä. Laitteelle on käyttöohjeissa annettu käyttölämpötilaksi -15 °C - + 30 °C, muissa lämpötiloissa laitteen toiminta voi mahdollisesti häiriintyä.

Todennäköisyys:

Laite on melko yksinkertainen ja toimintavarma. Siinä on kahdennettu hälytys-systeemi ja lisäksi erillinen testisysteemi. Jos testaus suoritetaan säännöllisesti, väärän toiminnan riski on melko pieni.

Seuraus:

Jos laite kuitenkin toimii väärin ja antaa harhaanjohtavia tuloksia, voi siitä olla vakavia seurauksia. Jos erehdytään pitämään jännitteellistä johdinta jännitteettömänä ja tämän johdosta alitetaan minimityöskentelyetäisyydet voi seurauksena olla sähköisku.

Suuruus:

Merkittävä riski, mahdollisista seurauksista johtuen.

Liika luottamus laitteeseen

Kuvaus:

Tehdään jännitteettömyyden toteaminen vain JET-laitteella tai luotetaan virheellisesti siihen, että JET-laite hälyttää aina tarvittaessa. Ei käytetä ohjeiden mukaista jännitteettömyyden toteamista ennen maadoitusten tekoa.

Syy:

Laite osoittautuu käytössä toimivaksi, joten siihen aletaan luottaa liikaa. Ohjeiden noudattaminen laiminlyödään kiireen tai välinpitämättömyyden vuoksi.

Todennäköisyys:

Jos laite on jatkuvassa käytössä ja se tuntuu luotettavalta, siihen aletaan myös luottaa. Vaivalloisempi ohjeiden mukainen jännitteettömyyden toteaminen voi jäädä tällöin ehkä tekemättä, varsinkin jos välineet eivät ole lähistöllä.

Seuraus:

Rikotaan voimassa olevia ohjeita, jos jännitteettömyyttä ei varmisteta hyväksytyllä koettimella. Jos JET- laite toimii väärin tai laitteen antamaa tulosta tulkitaan väärin, voi aiheutua sähköiskun vaara. Näitä asioita on tarkasteltu enemmän kyseisten riskien kohdalla.

Suuruus:

Kohtalainen riski

Väärät luulot laitteen toiminnasta

Kuvaus:

Ei tiedosteta laitteen toimintaan liittyviä rajoituksia. Luullaan laitetta hälytyslaitteeksi, joka hälyttää aina kun lähellä on jännitteisiä kohteita. Oletetaan laitteen toimivan myös taskusta.

Todennäköisyys:

Laitteen toiminnasta voi syntyä vääriä luuloja jos odotukset laitetta ja sen toimintaa kohtaan ovat liian suuret. Jos laitteen käyttöön on opastettu ja käyttöohjeeseen tutustuttu, niin vääriä luuloja ei pitäisi jäädä.

Seuraus:

Valheellinen turvallisuudentunne, joka voi johtaa varomattomaan käytökseen jännitteellisten kohteiden läheisyydessä. Tästä voi olla seurauksena sähköisku.

Suuruus:

Merkittävä riski

Valitaan mittauskohta väärin

Kuvaus:

Mitataan laitteella tietyn johtimen jännitteettömyyttä, mutta ei olla työkohteen välittömässä läheisyydessä. Saadaan mahdollisesti väärä oletus työkohteen jännitteisyydestä.

Syy:

Epähuomio mitattaessa, mitataan väärää johdinta. Ei tiedosteta, että jännite voi kytkeytyä kohteeseen myös jostain muusta suunnasta. Mitataan auki olevan erottimen takaa.

Seuraus:

Johto jota mittauksen perusteella luullaan jännitteettömäksi onkin jännitteellinen.

Tästä seuraa sähköiskun vaara lähestyttäessä johdinta.

Todennäköisyys:

Jos jännitteettömyys on kerran todettu, niin on mahdollista että sitä ei tule uudestaan varmistettua siirryttäessä vain vähän matkaa. Tämä virhe voi sattua helposti.

Suuruus:

Merkittävä riski

Käytetään kohteissa, joihin laite ei sovellu

Kuvaus:

Käytetään JET-laitetta jännitteettömyyden toteamiseen muuntajakopin sisällä tai muussa kohteessa, jossa maadoitettujen kohteiden läheisyyden vuoksi laitteen antamasta tuloksesta ei voida päätellä kohteen jännitteellisyyttä. Käytetään maadoitettujen kohteiden, kuten pylväiden lähellä. Ne vääristävät sähkökenttää ja siten myös mittaustulosta. Saatu tulos voi olla harhaanjohtava ja johtaa väärään tulkintaan jännitteellisyydestä.

Syy:

Maadoitetut kohteet heikentävät kenttää, kuten kappaleissa 4.1.2 ja 4.1.3 on käyty läpi. Tällöin mitattu tulos ei vastaa todellista tilannetta.

Todennäköisyys:

Melko suuri. Ohjeissa on maininta, että laitetta tulee käyttää vähintään 0,5 m etäisyydellä metallisista rakenteista. Tämä on kuitenkin asia, jossa virhearvioinnin mahdollisuutta ei saisi olla. Sen arvioiminen missä laitetta voi käyttää ja missä ei tulisi olla hyvin selkeää. Muuntajakoppi on tila, jossa laitteen voi helposti olettaa toimivan.

Seuraus:

Syntyy vaara sähköiskusta, jonka mahdollisena seurauksena on kuolema.

Suuruus:

Sietämätön riski

Väärä mittausasento valittuna

Kuvaus:

Mitataan johtimen jännitteellisyyttä JET-laitteen väärällä mittausasennolla. Riski aiheutuu kun käytetään LÄHI-asentoa, mutta ei kuitenkaan olla riittävän lähellä kohdetta. Näin voidaan päätyä oletukseen jännitteettömyydestä, vaikka kohde olisikin jännitteellinen.

Syy:

Väärä asento jäänyt päälle epähuomiossa tai on sattunut sekaannus asentoa valittaessa. Ymmärrys eri asentojen toiminnasta saattaa myös olla puutteellinen tai väärä.

Todennäköisyys:

Käyttöohjeissa kerrotaan laitteen oikeasta toiminnasta ja eri asentojen käytöstä. Asentojen valintakytkin on selkeä. On kuitenkin mahdollista epähuomiossa käyttää väärää asentoa, jos sitä ei tarkista erikseen. Kytkimen asento voi myös vahingossa vaihtua, tällöin kuitenkin laitteen ledit, summeri ja värinä kytkeytyvät hetkeksi päälle. Mitattaessa asennon vaihtumisen kyllä huomaa. Jos asento on kuitenkin vaihtunut esimerkiksi taskussa laitteen ollessa mahdollisesti poissa päältä, täytyy oikea mittausasento aina ennen mittausta varmistaa.

Seuraus:

Mittauksessa on käytetty LÄHI-asentoa, mutta on oltu niin kaukana kohteesta, että tietoa jännitteellisyydestä ei ole saatu, mittausta ei ole enää suoritettu lähempää. Kohde on tulkittu jännitteettömäksi ja tästä aiheutuu vaara sähköiskusta

Suuruus:

Merkittävä riski

Väärä ote laitteesta

Kuvaus:

Oikeanlaisessa otteessa laitteesta pidetään kiinni sen alareunasta siten, että laite ja sen sensorialue ovat vapaasti esillä. Vääränlaisessa otteessa laitteen sensorialue peittyy osittain tai täysin. Tällainen ote voisi olla esimerkiksi sellainen, että laite on kokonaan kämmenen sisällä. Toinen mahdollinen väärä ote on sellainen, että laite on kädessä väärinpäin sensorialue alaspäin. Myös laitteen etäisyys kehosta vaikuttaa tulokseen.

Syy:

Laite on pienikokoinen ja mahtuu hyvin käteen väärässäkin asennossa. Kiireessä ei välttämättä tule kiinnitettyä huomiota siihen onko laite kädessä oikein. Erityisesti sensorialueen peittyminen heikentää tulosta.

Todennäköisyys:

Oikeassa otteessa laitteesta ei ole kovin tukevaa otetta. Laitteen ottaakin helposti käteensä hieman väärässä otteessa, jossa sitä pidetään tukevammin kädessä. Vaikka sensorialue ei peitykään, niin käden läheisyys vaikuttaa tulokseen. Laitteen tekstit ja merkinnot ohjeistavat oikeaan otteeseen ja käyttöohjeessa tähän on kiinnitetty huomiota. Sel-

lainen väärä ote, joka merkittävästi vääristäisi tulosta, ei ole kovin todennäköinen. Jos sensorialue ei peity, saadaan kuitenkin melko hyvä tulos.

Seuraus:

Jos sensorialue on peittynyt kämmenen sisään mitattaessa, mittaustulos vääristyy huomattavasti. Mittaustulos pienenee myös jos laite on liian lähellä kehoa. Tästä voi seurata tuloksen väärä tulkinta, etenkin jos mittauspaikkakin on valittu huonosti. Jos johtimen jännitteellisyys tulkitaan väärin, voi seurata sähköisku johdinta lähestyttäessä.

Suuruus:

Kohtalainen riski

Tulkitaan laitteen antama tulos väärin

Kuvaus:

Saadaan mittauksesta tulos, mutta sitä ei osata tulkita oikein.

Tuloksen perusteella ei osata tulkita, mikä johdin on jännitteellinen ja mikä maadoitettu tai missä on mahdollisesti indusoitunutta jännitettä.

Syy:

Useamman johdon tilanteessa JET-laite huomaa jännitteellisten johtimien sähkökentät, jolloin jännitteettömän johtimen tulkitseminen voi olla vaikeaa. On mahdollista, että täyttä varmuutta johtimien jännitteistä ei etäämmältä välttämättä voida saada.

Todennäköisyys:

Useamman johdon tapauksessa hyvin mahdollista, että ei saada täysin yksiselitteistä tulosta johtimien jännitteistä

Seuraus:

Jännitteettömyys täytyy varmistaa muilla menetelmillä, kuten aina muulloinkin pitää ohjeiden mukaisesti tehdä ennen kohteen maadoittamista. Sähköiskun vaara seuraa jos näin ei tehdä, vaan luotetaan JET-laitteen perusteella tehtyyn väärään arvioon.

Suuruus:

Merkittävä riski

Hälytystä ei huomata

Kuvaus:

Vaikka JET ei ole hälytyslaite, voi se hälyttää vaikkei sillä hetkellä varsinaisesti mitataisikaan. Tarpeeksi lähellä jännitteistä kohdetta JET voi hälyttää myös taskusta, hälytystä ei kuitenkaan välttämättä havaita. Tällöin ei kuitenkaan ole kyseessä sellainen JET laitteen käyttö, johon se on tarkoitettu.

Syy:

Värinä ei tunnu takin läpi, eikä myöskään hälytysääni kuulu sieltä. Varsinkaan meluisassa ympäristössä.

Seuraus:

Mennään liian lähelle jännitteistä kohdetta, josta seuraa vaara sähköiskusta.

Todennäköisyys:

Kun laite on taskussa, se ei luultavasti ole päällä, jolloin se ei myöskään hälytä. Laitetta ei nykymuodossaan ole tarkoitettu tällaiseksi hälytyslaitteeksi, eikä se toimi luotettavasti sellaisena. Laitetta ei pidä myöskään yrittää sellaisena käyttää. Seurauksena olisi väärä turvallisuuden tunne.

Suuruus:

Vähäinen riski

Kenttä ei anna luotettavaa tietoa jännitteellisyydestä

Kuvaus:

Jet-laitteella mitattaessa saadaan tulos johtimen ympärillä vaikuttavasta sähkökentästä. Siitä ei kuitenkaan pystytä luotettavasti sanomaan, mikä on johtimen tarkka jännitetilanne. Ei saada varmuutta siitä, onko johtimessa normaali jännite, onko se maadoitettu vai vaikuttaako siinä mahdollisesti indusoitunut jännite. Tämä tilanne voi esiintyä kohteissa, jossa on kaksi tai useampi rata rinnan

Syy:

Useamman johtimen ollessa rinnakkain, jokaisen johtimen luoma sähkökenttä vaikuttaa JET-laitteen tulokseen. Tätä on käsitelty tarkemmin kappaleessa 5 mallinnuksen avulla. Jännitteisen johtimen luoma sähkökenttä vaikuttaa taustalla niin suurena, että ei pystytä täysin luotettavasti tulkitsemaan toisen johtimen tilanteesta sitä onko se jännitteetön, maadoitettu vai vaikuttaako siinä indusoitunut jännite.

Seuraus:

Jännitteettömyyttä ei pystytä luotettavasti toteamaan, joten on käytettävä muita menetelmiä. Toinen vaihtoehto on, että tehdään väärä tulkinta josta seurauksena mahdollinen sähköiskun vaaran kasvu.

Todennäköisyys:

Ratatöissä voi helposti esiintyä tämänkaltaisia tilanteita.

Suuruus:

Kohtalainen riski

Laite ei ole mukana

Kuvaus:

Laite ei ole mukana silloin kun ollaan työkohteessa ja ollaan kiinnostuneita siitä onko kohteessa jännitettä.

Syy:

Laitetta ei ole otettu mukaan lähdettäessä työkohteeseen. Joko se on unohtunut ottaa mukaan ja jäänyt lataukseen tai muualle tai sitten sitä ei ole haluttu ottaa mukaan. Laite voidaan kokea turhaksi ja sen takia jätetään ottamatta mukaan.

Seuraus:

Laitetta ei voida käyttää, joten laitteesta ei ole mitään hyötyä. Lisäturvan puute nostaa hieman sähköiskun mahdollisuutta.

Todennäköisyys:

JET-laitteen etuna on sen pieni koko, toisaalta pienestä koosta voi kuitenkin olla myös haittaa. Pieni laite unohtuu helpommin ottaa mukaan työkohteeseen lähdettäessä. Laite voi pienen kokonsa vuoksi helposti jäädä esimerkiksi toisen takin taskuun tai muuten hukkuu.

Suuruus:

Vähäinen riski

Laitetta ei käytetä

Kuvaus:

Laite on mukana, mutta sitä ei kuitenkaan käytetä jännitteettömyyden varmistamiseen.

Syy:

Laitteen käyttöä ei koeta tarpeelliseksi, koska jännitteettömyys on jo todettu perinteisillä välineillä tai siihen luotetaan muuten. Laite koetaan ylimääräiseksi ja turhaksi. Kiireessä ei haluta tehdä mitään mikä koetaan ylimääräiseksi.

Seuraus:

Laitteesta ei ole mitään hyötyä ellei sitä käytetä, jolloin kaikki sen mahdollisesti tuoma lisäturva menetetään. Tämä lisää sähköiskun mahdollisuutta verrattuna tilanteeseen, jossa JET-laitetta olisi käytetty.

Suuruus:

Vähäinen riski

JET-laitteen avulla pienennettävät vaarat

Vaarat on käyty läpi ja riskien suuruus on arvioitu ajatellen, että JET-laitetta ei ole käytössä. Näin on haluttu selvittää nykymenttelyjen vaaroja ja niitä riskejä, joihin JET-laitte voisi vaikuttaa.

Lähestytään jännitteellistä johdinta

Kuvaus:

Lähestytään johdinta tai kohdetta, jonka luullaan olevan jännitteetön. Johtimessa on kuitenkin jännite, joko normaali käyttöjännite tai toisista johtimista indusoitunut pienempi jännite.

Syy:

Luullaan kohdetta virheellisesti jännitteettömäksi. Tähän voi olla monia syitä, kuten inhimillinen erehdys johtimista, työmaadoitukset tekemättä tai puutteelliset.

Seuraus:

Liian lähelle johdinta lähestyttäessä seuraa vakava vaaratilanne minimityöskentelyetäisyyksien alittuessa. Tästä voi olla seurauksena sähköisku kosketuksen tai valokaaren kautta.

Todennäköisyys:

Aina mahdollista monistakin syistä.

Suuruus:

Merkittävä riski

Viallinen jännitteenkoetin

Kuvaus:

Käytössä oleva jännitteenkoetin on viallinen, eikä ilmaise kohteen jännitettä.

Syy:

Laite on vikaantunut tai jokin muu syy.

Seuraus:

Jännitteenilmaisin ei ilmaise jännitettä, jolloin kohde oletetaan jännitteettömäksi. Kohdetta aletaan maadoittaa tai kohteeseen mennään töihin. Mahdollinen sähköisku

Todennäköisyys:

Vikoja on esiintynyt joissain malleissa. Käytössä on vanhojakin laitteita.

Suuruus:

Kohtalainen riski

Ylitetään työskentelyrajat

Kuvaus:

Työskenneltäessä jännitteestä erotetulla alueella ylitetään työskentelyalueen raja ja päädytään jännitteiselle alueelle.

Syy:

Ei olla täysin tietoisia jännitteettömästä alueesta ja epähuomiossa ylitetään työskentelyrajat. Työskennellään liian lähellä jännitteisiä kohteita.

Seuraus:

Minimi työskentelyetäisyyksien alittuessa syntyy vaaratilanne, joka voi johtaa sähköiskuun.

Todennäköisyys:

Työskenneltäessä ratapihalla johtimia on paljon ympäristössä ja työskentelyalueen rajat voivat olla lähellä työkohdetta. Tässä tilanteessa vahinko käy helposti.

Suuruus:

Merkittävä riski.

Oletetaan jännitteettömyys

Kuvaus:

Herää epäily jonkin kohteen jännitteettömyydestä. Kohteeseen mennään kuitenkin töihin ilman lisävarmistusta luottaen siihen, että kohde on jännitteetön.

Syy:

Jännitteettömyyttä ei ole erikseen kohteesta varmistettu.

Seuraus:

Sähköisku, jos kohde on jännitteellinen.

Todennäköisyys:

Kohteeseen ei kovin todennäköisesti mennä töihin, jollei sitä ole selvästi maadoitettu. Jos taas epäillään maadoituksen luotettavuutta, jännitteettömyyden toteaminen saattaa kuitenkin jäädä tekemättä.

Suuruus:

Kohtalainen riski.

Maadoitus on tekemättä tai pettää

Kuvaus:

Maadoitus on jostakin syystä jäänyt tekemättä tai se on tehty erehdyksessä väärään johtimeen. Maadoitus on tehty puutteellisesti ja se pettää.

Syy:

Kiire ja välinpitämättömyys voivat johtaa siihen, ettei maadoitusta tehdä. Useamman radan tilanteessa on mahdollista, että juuri kyseistä johtoa ei olekaan maadoitettu ja siinä vaikuttaa indusoitunut jännite.

Seuraus:

Jos maadoittamattomaan johtoon mennään töihin ja siinä on joko normaali tai indusoitunut jännite, on seurauksena sähköisku.

Todennäköisyys:

Ratatoissa maadoituksen tekemättä jättämisen todennäköisyys ei ole kovin suuri. Työntekijät ymmärtävät asian vaarallisuuden. Inhimilliset virheet maadoitusta tehtäessä ja maadoitetusta johdosta erehtyminen ovat kuitenkin aina mahdollisia.

Suuruus:

Merkittävä riski

Virheelliset tiedot sähkökytkennöistä

Kuvaus:

Ryhmityskaavion tiedot eivät pidä paikkaansa.

Syy:

Virhe ryhmityskaaviota tehdessä tai sitä ei ole pidetty ajan tasalla.

Seuraus:

Työkohde pysyy jännitteisenä vaikka ryhmityskaavion mukaan sitä syöttävä johto tehtäisiin jännitteettömäksi. Vaikka jännitteettömyys todetaan tästä johtimesta ja se maadoitetaan asianmukaisesti, pysyy työkohde edelleen jännitteisenä. Jos jännitteettömyyttä ei vielä erikseen todeta työkohteesta, seuraa sähköisku työkohteeseen mentäessä.

Todennäköisyys:

Poikkeuksellista, mutta aina mahdollista. Kappaleessa 9 käsitelty kuolemantapaus vuodelta 2006 johtui osittain tällaisesta virheestä ryhmityskaaviossa.

Suuruus:

Merkittävä riski.